



TITLE:

水力発電設備の持続的使用を目的
としたダム貯水池土砂管理に関す
る研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

奥村, 裕史

CITATION:

奥村, 裕史. 水力発電設備の持続的使用を目的としたダム貯水池土砂管理に関する研究. 京都大学, 2013, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2013-03-25

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k17533>

RIGHT:

水力発電設備の持続的使用を目的とした
ダム貯水池土砂管理に関する研究

Reservoir Sedimentation Management
in Hydropower Plant for Sustainable Power Generation

2013 年

奥村 裕史

Abstract

Sedimentation in hydropower reservoir is one of the most important problems for sustainable power generation. This paper has analyzed condition of sedimentation in hydropower reservoir and sedimentation problems, and using the results of the analysis prepared the effective and economical sedimentation managements for power plant and environment of river basin.

In Japan, the energy problem has been a big issue. It is not only the recent situation caused by the nuclear power plant accident in the 2011 Great East Japan Earthquake, but also low self-sufficiency ratio for energy, limited fossil fuel and steep rise in energy charge. Therefore they have been influencing on domestic industries, many companies have started to prepare having their factories out of Japan seeking for low price energy, and employment movement in Japan has been losing activeness. Hydropower is very expecting as a domestic, clean and renewable energy source and has the future roles, which are new development of plants, repowering plants, advancing operation and sustainable power generation of existing plants.

For achievement of sustainable power generation of existing hydropower plants, reservoir sedimentation is one of the most important problems. Many hydropower plants were installed in post war reconstruction period. For decades, reservoirs have stored much sedimentation inside up to sedimentation ratio 10% because of high degree of sediment production and river flow regime in Japan. Therefore, many disadvantageous things have occurred, which are loss of reservoir capacity, aggradation of upstream riverbed and obstacle for intake and outlet functions. To avoid these things, excavation or dredging have been usually conducted in many reservoirs.

Social situation concerned river and sediment has been changing drastically in this fifteen years. In 1997 River Law in Japan was changed considerably, especially in the part of sediment control. Before the change of River Law, sediment should be kept in mountains for disaster prevention, after the change sediment should be flown down the river for environment of river basin. It is called comprehensive sediment management. And people concerned the river have started to expect sediment flowing in river channel for eco-system service including landscape, leisure and habitats such as fishes.

It is time to change sedimentation management of hydropower reservoir, because of the reasons below. They is too much sediment to remove, resulting too much cost for excavation, and no disposal site near reservoir, on the other hand, sediment flow is strongly requested in dam downstream river and coastal area. It is not effective to excavate and dispose sediment just considering hydropower generation. Appropriate

sedimentation management is needed both for power generation and river basin sustainability. Instead of excavation, sediment bypass operation, flushing gate operation and sediment restoration are effective for river basin environment and sustainable power generation.

In this background, this paper discusses the appropriate sediment management for hydropower reservoir. This paper consists of seven chapters. Contents of the chapters are written below.

1. INTRODUCTION

Background and purpose of this research are described in this chapter. Characters of land and climate of Japan, history of hydropower installation, and problems concerned with reservoir sedimentation are described. Because of active sediment production and much rain fall, dams in Japan have incurred sedimentation problem in these days. As countermeasure against reservoir sedimentation, installation of sedimentation capacity, monitoring sedimentation and local excavation have been selected as ordinary ways for many years. In 1997 River Law in Japan changed, sedimentation control had drastically changed from keeping sediment in mountains for disaster prevention to flowing sediment down the river for environment of river basin. For sustainable power generation, sedimentation management is not only for keeping reservoir capacity and riverbed control, but also for environment of river basin. Regarding these situation, reservoir sedimentation management has been discussed.

2. CIRCUMSTANCES AROUND HYDROPOWER

In this chapter, importance of sustainable power generation of existing hydropower plant is presented regarding energy situation and circumstances around hydropower in Japan. Hydropower has been changing the role of energy supply, from base energy source to peak energy source. In these days, it has been more important to sustain power generation of existing hydropower plant as a role of regulating power supply using its convenience of easy start and stop generation. Hydropower has more advantageous points, such as producing no greenhouse gas in operation, renewable and domestic. The climate change and extensive disaster make hydropower more important. Therefore, existing hydropower plant has to be maintained for sustainable power generation.

3. SEDIMENTATION PROBLEMS

Reservoir sedimentation mechanism, problems and their countermeasures are discussed in this chapter. Installation of sediment capacity in reservoir is now inefficient and it is needed to have new measures which do not depend on excavation and dredging. There are two major types of hydropower reservoir, one is storage reservoir, the other is regulating reservoir. They are different from each other not only in reservoir capacity and operation but also shape of sedimentation and problems concerned sedimentation. Analysis of reservoir sedimentation regarding storage reservoir and regulating reservoir shows some useful properties for planning measures, and it is prior to conduct sedimentation management in regulating reservoir because of prevention from flood disaster at backwater area. On the other hand, a sedimentation problem in storage reservoir is latent and the problem is loss of power generation because of losing capacity. It is effective to treat sedimentation problems separately regulating reservoir and storage reservoir.

4. SEDIMENTATION MANAGEMENT IN REGULATING RESERVOIR

Sedimentation problem in regulating reservoir is riverbed aggradation leading to high flood risk around reservoir. Regarding the result of analysis in third chapter, regulating reservoirs could be categorized to three types by sedimentation shapes and reservoir water level conditions in flood time. Three types of reservoirs mean lake type, river type and intermediate type. Effective and economical measures mainly conducted by draw-down operation are proposed for each type of regulating reservoir, and verified by calculation analysis and cost comparison. Draw-down operation is effective for regulating reservoir sedimentation management because of large spillway gate in contrast with dam height and regulating reservoir operation rule which is usually keeping dam water level high.

5. SEDIMENTATION MANAGEMENT IN STORAGE RESERVOIR

Sedimentation problem in storage reservoir is loss power generation occurred by loss of reservoir capacity with sedimentation progress. The problem is now latent and not severe. Future energy loss and cost of sedimentation management are calculated and the result is that it is economically feasible to install a sediment bypass, which is appropriate to restore sediment to river for environment including the coastal area. The result indicates the period of starting management. Regarding timing of sediment bypass installation, it would be better to be done earlier for cost saving and environment improvement point of view.

6. INTEGRATED SEDIMENT MANAGEMENT IN HYDROPOWER RESERVOIR

Necessity of overall sediment management in river basin including hydropower reservoir is discussed and several case studies are conducted in this chapter. Sediment management ideas are now varied depending on their own position such as dam owner, river officer and people concerned the river, but in the future their ideas are going to be closer because it is advantageous for dam owner to use water flow and restore sediment to dam downstream river. For realization of this integrated sediment management, there are two challenges, one is saving much cost and the other is building consensus of all people concerned the river. Methodology of sediment management has been almost matured, now it is time to focus on practical study.

7. CONCLUSION

Summary of outcomes is presented in this chapter. Some considerations are also described.

目 次

第一章 序 論	1
1.1 はじめに	1
1.2 電源開発株式会社が所有・管理するダム湖の堆砂状況	3
1.3 ダム湖土砂管理をとりまく情勢の変化	4
1.4 研究の目的	4
1.5 論文の構成	5
第二章 水力発電をとりまく情勢	8
2.1 我が国の電力エネルギー事情	8
2.2 我が国における水力発電の役割	12
2.3 気候変動が予想される中での水力発電のあるべき姿	15
2.4 東日本大震災を踏まえた水力発電のあるべき姿	17
2.5 再生可能エネルギー導入が進行する中での水力発電の役割	20
2.6 水力発電用ダム湖における堆砂対策の必要性	21
2.7 まとめ	23
第三章 水力発電用ダム湖の堆砂問題および対策	25
3.1 水力発電用ダム貯水池と調整池	25
3.2 水力発電計画時における堆砂対策	27
3.3 貯水池および調整池における堆砂状況	27
3.4 貯水池および調整池における堆砂等の特徴	35
3.4.1 貯水池および調整池の総貯水容量および有効貯水容量	35
3.4.2 貯水池および調整池の堆砂状況	36
3.4.3 貯水池および調整池における堆砂の位置	36
3.4.4 貯水池および調整池における流入土砂量	38
3.5 調整池の堆砂問題	39
3.6 貯水池の堆砂問題	40
3.7 水力発電用ダム湖における堆砂対策	48
3.7.1 水力発電用ダム湖における堆砂問題の特徴	48
3.7.2 水力発電用ダム湖における堆砂対策	48
3.8 まとめ	51
第四章 水力発電用ダム調整池の堆砂対策	53
4.1 調整池のタイプ分類（池タイプ、川タイプ、中間タイプ）	53

4.1.1	ダム湖内の堆砂形状に関する従来の研究	53
4.1.2	調整池上流域土砂生産状況と堆砂対策必要性との関連性	54
4.1.3	調整池堆砂位置、既往最大洪水位・最深河床位による分析	55
4.1.4	分析結果に基づく調整池のタイプ分類	58
4.2	川タイプ調整池におけるダム水位低下運用を主とした堆砂対策	59
4.2.1	河床変動解析モデルおよび検討ケース	59
4.2.2	河床変動解析による堆砂対策の物理的有効性評価	61
4.2.3	ダム水位低下運用による堆砂対策の経済性評価	62
4.3	中間タイプ調整池におけるダム水位低下運用を主とした堆砂対策	63
4.3.1	河床変動解析モデルおよび検討ケース	63
4.3.2	河床変動解析による堆砂対策の物理的有効性評価	64
4.3.3	ダム水位低下運用等による堆砂対策の経済性評価	65
4.4	池タイプ調整池におけるダム水位低下運用を主とした堆砂対策	66
4.4.1	F 調整池（池タイプ）の概要	67
4.4.2	F 調整池（池タイプ）の堆砂対策	68
4.4.3	河床変動解析による堆砂対策の物理的有効性評価	69
4.4.4	ダム水位低下運用等による堆砂対策の経済性評価	70
4.4.5	排砂バイパスがダム下流河川へ及ぼす影響の評価	71
4.5	発電用ダム調整池の堆砂対策	73
4.6	ダム湖の土砂捕捉率、洪水吐高率に関する検討	75
4.6.1	ダム湖の土砂捕捉率と堆砂対策	75
4.6.2	洪水吐高率と堆砂対策	76
4.7	まとめ	78
第五章	水力発電用ダム貯水池の堆砂対策	80
5.1	水力発電計画	80
5.2	発電運用（水使用率）に影響を及ぼす要因の整理	84
5.3	発電運用（水使用率）の評価式	84
5.4	貯水池堆砂進行が発電運用に及ぼす影響の予測	86
5.5	貯水池における堆砂対策の必要性	87
5.6	貯水池における有効な堆砂対策	88
5.6.1	貯水池堆砂進行が発電設備経済価値に及ぼす影響	88
5.6.2	経済性比較における費用計算方法	89
5.6.3	今後 300 年間の累計費用計算結果	90
5.7	まとめ	94

第六章 水力発電用ダム湖における総合土砂管理の推進	96
6.1 水力発電用ダム湖の土砂管理において要求される事項	96
6.2 土砂管理において要求される事項に応える堆砂対策	97
6.2.1 利水者にとって必要なダム湖土砂管理	97
6.2.2 流域関係者他（利水者以外）が求めるダム湖土砂管理	100
6.2.3 まとめ	104
6.3 S川（T川）の水力発電用ダム湖における堆砂対策実施状況と課題	105
6.3.1 S川（T川）の水力発電設備およびダム湖堆砂状況	105
6.3.2 S川（T川）の水力発電用ダム湖堆砂対策の現状	107
6.3.3 S川（T川）の水力発電用ダム湖における長期的な堆砂対策	110
6.3.4 平成23年台風12号によるS川（T川）に存在するダム湖の堆砂対策への影響	111
6.3.5 まとめ	113
6.4 N川の水力発電用ダム湖における堆砂対策実施状況と課題	114
6.4.1 N川の水力発電設備およびダム湖堆砂状況	114
6.4.2 N川の水力発電用ダム湖堆砂対策の現状	116
6.4.3 N川の水力発電用ダム湖における長期的な堆砂対策	117
6.4.4 平成23年7月深層崩壊に伴う調整池土砂流入	118
6.4.5 まとめ	119
6.5 水力発電用ダム湖における総合土砂管理の課題	120
6.5.1 設備投資を伴う堆砂対策費用	120
6.5.2 流域関係者合意形成	126
6.5.3 まとめ	128
6.6 まとめ	130
第七章 結 論	133
謝 辞	137

図目次

図－1.1	電源開発株式会社が所有・管理するダム湖の堆砂対策状況	3
図－2.1	我が国のエネルギー源別発電設備容量の経年変化	8
図－2.2	我が国のエネルギー源別発生電力量の経年変化	9
図－2.3	世界の国別水力発電設備容量	10
図－2.4	世界の国別発生電力量電源構成	10
図－2.5	日本のエネルギー自給率および内訳（2008 年）	11
図－2.6	日本のエネルギー源構成（日間）	12
図－2.7	水力発電の既開発・工事中地点と未開発地点との比較	14
図－2.8	100 年確率洪水流量の現在気候に対する近未来気候との比較、および 21 世紀末との比較	15
図－2.9	木曽川水系主要ダム流入量の将来変化予測結果 ¹⁾	16
図－2.10	東北地方太平洋沖地震の震源および震度分布図	18
図－2.11	地震前後の東京電力月別最大電力負荷時の電源構成	19
図－2.12	再生可能エネルギーの固定買取制度のしくみ	20
図－2.13	今後の水力発電の課題および対策	23
図－3.1	水力発電所の種類	25
図－3.2	水力発電所の設置状況	26
図－3.3	堆砂量経年変化および年間総流入水量（S 貯水池）	28
図－3.4	堆砂量経年変化および年間総流入水量（K 貯水池）	29
図－3.5	堆砂量経年変化および年間総流入水量（F 調整池）	29
図－3.6	堆砂量経年変化および年間総流入水量（Y 貯水池）	30
図－3.7	堆砂量経年変化および年間総流入水量（H 調整池）	30
図－3.8	堆砂量経年変化および年間総流入水量（Z 調整池）	31
図－3.9	年間総流入量と年間堆砂量との関係（S 貯水池）	31
図－3.10	年間総流入量と年間堆砂量との関係（左：K 貯水池、右：F 調整池）	32
図－3.11	年間総流入量と年間堆砂量との関係（左：Y 貯水池、右：H 調整池）	32
図－3.12	年間総流入量と年間堆砂量との関係（Z 調整池）	32
図－3.13	総貯水容量および有効貯水容量についての貯水池と調整池との関係	35
図－3.14	貯水池および調整池のダム湖寿命	36
図－3.15	貯水池および調整池における堆砂の位置	37
図－3.16	貯水池および調整池の流入土砂量とダム湖寿命との関係	39

図-3.17	○発電所（○ダム貯水池）	水使用率の経年変化（1988年～2011年）	43
図-3.18	M発電所（Mダム貯水池）	水使用率の経年変化（1988年～2011年）	43
図-3.19	W発電所（Wダム貯水池）	水使用率の経年変化（1988年～2011年）	43
図-3.20	Y発電所（Yダム貯水池）	水使用率の経年変化（1988年～2011年）	44
図-3.21	R発電所（Rダム貯水池）	水使用率の経年変化（1988年～2011年）	44
図-3.22	K発電所（Kダム貯水池）	水使用率の経年変化（1988年～2011年）	45
図-3.23	S発電所（Sダム貯水池）	水使用率の経年変化（1988年～2011年）	45
図-3.24	有効貯水回転率と水使用率との関係		46
図-3.25	Yダム地点堆砂率別ダム運用比較（2005年9月出水）		47
図-3.26	ダム湖土砂管理方法分類		49
図-3.27	ダム湖回転率とダム湖寿命による堆砂対策区分		50
図-4.1	江崎によるダム湖内の堆砂形状分類		53
図-4.2	流入土砂量と流域面積の関係		54
図-4.3.1	F調整池の単位堆砂量、既往最大流量流下時の水位、最深河床の縦断分布		56
図-4.3.2	H調整池の単位堆砂量、既往最大流量流下時の水位、最深河床の縦断分布		56
図-4.3.3	Z調整池の単位堆砂量、既往最大流量流下時の水位、最深河床の縦断分布		56
図-4.4	Z調整池（川タイプ）河床変動解析結果（位置別28年間累計堆砂量）		61
図-4.5	Z調整池（川タイプ）河床変動解析結果（累計堆砂量変化）		61
図-4.6	H調整池（中間タイプ）河床変動解析結果（位置別22年間累計堆砂量）		64
図-4.7	H調整池（中間タイプ）河床変動解析結果（累計堆砂量経年変化）		65
図-4.8	F調整池（池タイプ）の平面形状		67
図-4.9	F調整池（池タイプ）の河床縦断形状および洪水水位		68
図-4.10	F調整池（池タイプ）河床変動数値解析結果		70
図-4.11	Fダム下流 河川区間堆砂量・出水時洪水水位の変化（30年後）		72
図-4.12	Fダム下流 河床材料平均粒径の変化（30年後）		73
図-4.13	洪水吐高率と流入土砂捕捉率との関係		77
図-5.1	流況曲線		81
図-5.2	35日流量、65日流量、平水量、最大使用水量、常時使用水量と豊水量との関係		82
図-5.3	Rダム地点とYダム地点の流況特性		83
図-5.4	発電運用に影響を及ぼす要因		84
図-5.5	堆砂率と水使用率の将来予測		86
図-5.6	貯水池堆砂対策累計費用計算結果（S川（T川）、K貯水池、対象土量18万m ³ ）		91

図－5.7	貯水池堆砂対策累計費用計算結果（N 川、Y 貯水池、対象土量 9 万 m ³ ）	91
図－5.8	貯水池堆砂対策累計費用計算結果／12 円/kWh（S 川（T 川）、K 貯水池、対象土量 18 万 m ³ ）	93
図－5.9	貯水池堆砂対策累計費用計算結果／12 円/kWh（N 川、Y 貯水池、対象土量 9 万 m ³ ）	93
図－6.1	水力発電用ダム湖土砂管理における要求事項	96
図－6.2	集中型ダム事業（左）と治水・利水分離型ダム事業（右）	101
図－6.3	伴田・角によるダム堆砂リサイクル事業のフレーム	103
図－6.4	S 川（T 川）の K 貯水池式発電所・F 調整池式発電所の位置および諸元	106
図－6.5	平成 17 年より実施している K 貯水池および F 調整池における堆砂対策	107
図－6.6	F ダム下流河床位経年変化	109
図－6.7	S 川（T 川）の水力発電用ダム湖における長期的な堆砂対策	110
図－6.8	平成 23 年台風 12 号進路	111
図－6.9	平成 23 年台風 12 号による K 貯水池の堆砂状況の変化	113
図－6.10	N 川の Y 発電所・N 発電所・H 発電所の位置および諸元	115
図－6.11	H 調整池の堆砂対策（計画）	116
図－6.12	Y 貯水池および H 調整池の長期的堆砂対策	117
図－6.13	平成 23 年 7 月の出水・土石流流入前後の H 調整池の河床位	118
図－6.14	排砂バイパス設置に係る費用	122
図－6.15	F ダム調整池における排砂バイパス設置ルート	123
図－6.16	排砂バイパスの勾配および移動限界粒径（最大）	125
図－6.17	宮崎県耳川水系総合土砂管理に関する技術検討会の体制	127

表目次

表－1.1	国別大ダム保有数	1
表－1.2	ダム上流および下流におけるダム湖内堆砂進行の影響	2
表－2.1	水力発電の既開発地点と未開発地点との比較	14
表－2.2	東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）の概要	17
表－3.1	水力発電所の種類別運用方式・役割	26
表－3.2	電源開発株式会社の水力発電設備のうち貯水池式・調整池式・揚水式発電所ダムの竣工年	27
表－3.3	堆砂状況整理対象ダム湖	28
表－3.4	年間総流入量と年間堆砂量との相関	33
表－3.5	貯水池・調整池別堆砂状況調査結果（平成 20 年）	40
表－3.6	有効貯水回転率の発電運用開始当初と 2011 年との比較	41
表－3.7	貯水池における有効貯水容量内堆砂率および水使用率の変化	42
表－3.8	Y ダム地点の出水時ダム運用実績とシミュレーション結果との比較	47
表－4.1	堆砂位置等の整理対象調整池の諸元	55
表－4.2	調整池のタイプ分類	58
表－4.3	Z 調整池（川タイプ）河床変動解析検討ケース	60
表－4.4	Z 調整池（川タイプ）堆砂対策費用（今後 30 年間）	62
表－4.5	H 調整池（中間タイプ）河床変動解析検討ケース	63
表－4.6	H 調整池（中間タイプ）堆砂対策費用（今後 30 年間）	66
表－4.7	F 調整池（池タイプ）の諸元	67
表－4.8	F 調整池（池タイプ）比較分析堆砂対策ケース	69
表－4.9	F 調整池（池タイプ）堆砂対策費用（今後 30 年間）	71
表－4.10	水力発電用ダム調整池のタイプ別堆砂対策	74
表－4.11	Z 調整池および H 調整池のダム流入土砂捕捉率	75
表－4.12	B 調整池（中間タイプ）洪水吐高検討河床変動解析ケース	76
表－5.1	流況曲線における水量	81
表－5.2	発電使用水量と流況との比較	82
表－5.3	豊水量以上の流入量の合計が年間総流入量に占める割合	85
表－5.4	水使用率計算式の係数および計算結果	85

表－5.5	貯水池堆砂対策のケース.....	88
表－5.6	水力発電設備の経済価値.....	89
表－5.7	貯水池堆砂対策のケース.....	89
表－5.8	貯水池堆砂対策累計費用計算結果（S 川（T 川）、K 貯水池、対象土量 18 万 m ³ ）	90
表－5.9	貯水池堆砂対策累計費用計算結果（N 川、Y 貯水池、対象土量 9 万 m ³ ）	90
表－6.1	土砂管理において要求される事項の内容.....	97
表－6.2	水利使用者が行う貯水池およびダムに関する測定（水利使用規則）	98
表－6.3	ダム定期検査における主たる項目	98
表－6.4	ダム定期検査の総合判定.....	99
表－6.5	利水者以外がダム湖土砂管理において要求する事項と対応策となりうる堆砂対策	100
表－6.6	旭ダム排砂バイパス諸元.....	101
表－6.7	出し平ダム・宇奈月ダムのゲート排砂に係る事項	102
表－6.8	平成 23 年台風 12 号による洪水被害の概要	111
表－6.9	旭ダム排砂バイパスの堆砂対策単価の試算	112
表－6.10	平成 23 年 H ダムにおける堆砂対策費用試算	119
表－6.11	排砂バイパスの事例	120
表－6.12	排砂バイパスに係る費用.....	121
表－6.13	F ダム調整池排砂バイパス費用検討	124
表－6.14	排砂バイパスの勾配別の移動限界粒径（最大）および通水可能流量.....	125

第一章 序 論

1.1 はじめに

我が国の国土は、山地が多く地形が急峻である。また、構造線やそれに伴う変成帯が多く分布している。我が国の気候は、平均年間降水量が 1,700mm と多く、梅雨前線の活動や台風により、短期間にまとまった量の降水が生じる傾向がある¹⁾。このような条件から、我が国は世界的にみても土砂生産・流出の活発な地域である。

地形が急峻で河川勾配が大きく、降雨量が大きいという我が国においては、水利用の面、防災の面からダムを設置する意義が大きいといえる²⁾。そのことを象徴的に示すものとして、昭和初期に「害水を変じて資源と為す。」という河水統制事業が提唱されたことが挙げられる³⁾。このような背景があり、我が国は現在までに約 2,700 基の大ダム（ダム高 15m 以上のダム）を設置し、表－1.1 に示す通り世界第 4 位のダム保有国となった。

表－1.1 国別大ダム保有数⁴⁾

順位	国 名	調査結果
1	中国	22,000
2	米国	6,575
3	インド	4,291
4	日本	2,675
5	スペイン	1,196
6	カナダ	793
7	韓国	765
8	トルコ	625
9	ブラジル	594
10	フランス	569
その他		7,572
合 計		47,655

2000 年 WCD レポート⁴⁾

約 2,700 基のダム設置により、1 人あたりの表流水量（河川の総流出量を人口で割った値）が、戦後は世界平均の半分程度であった我が国であるが、1987 年には 1 人当たりの平均水使用量 920m³ となり、世界の 1 人当たりの平均水使用量 660m³ の 1.4 倍までに到達した。現在、我が国の河川水使用は、ダムの設置により世界的に高い水準にあるといえる⁵⁾。

一方、土砂生産・流出が活発であることは、ダム設置後の運用・維持管理において有利な条件ではない。ダム湖に流入する土砂のうち、粒径の小さな浮遊砂やウォッシュロードは、ダム放流、水使用にともなって多くは排出されるが、掃流砂や沈降した浮遊砂はダム湖内河床に堆積して堆砂となる。ダム湖内の堆砂が進行することによるダム上流および下流に及ぼす影響について、「貯水池土砂管理ハンドブック」⁶⁾には表－1.2 に示す通り整理されている。

表－1.2 ダム上流および下流におけるダム湖内堆砂進行の影響⁶⁾

位 置	影 響	内 容
ダム上流	ダム湖容量の減少	利水・洪水調節に必要なダム湖容量が減少する。
	河床位上昇	堆砂により河床位が上昇し、ダム湖周辺の社会資本の浸水被害リスクを高める。
	地震危険性増大	ダム堤体直上流の堆砂が地震時にダム堤体に土圧として作用する。
	設備磨耗	堆砂進行により、取水設備、放水設備、放流設備、ゲート水密部等を土砂が通過し、設備を磨耗させる。
	設備機能への影響	放水口付近に生じた堆砂は、発電水頭差を小さくさせ、発電機能を低下させる。取水口または放水口付近に生じた堆砂は、取水機能または放水機能を低下させる。
	生態系	堆砂進行により、貯水池・貯水池末端の地形、流況が変化し、生態系に影響を与える。
ダム下流	河床位低下	上流からの土砂供給がなくなり、河床材料の流失のみとなるため、河床位が低下する。
	河床材料粗粒化	上流からの土砂供給がなくなり、河床材料のうち砂礫は流失し、流されない巨礫のみが河床に残ることから、河床材料は粗粒化する。
	海岸侵食	河川から海岸への土砂供給量が減少し、海岸線が後退する。
	生態系	河床低下、河床材料粗粒化が生じ、生態系に影響を与える。

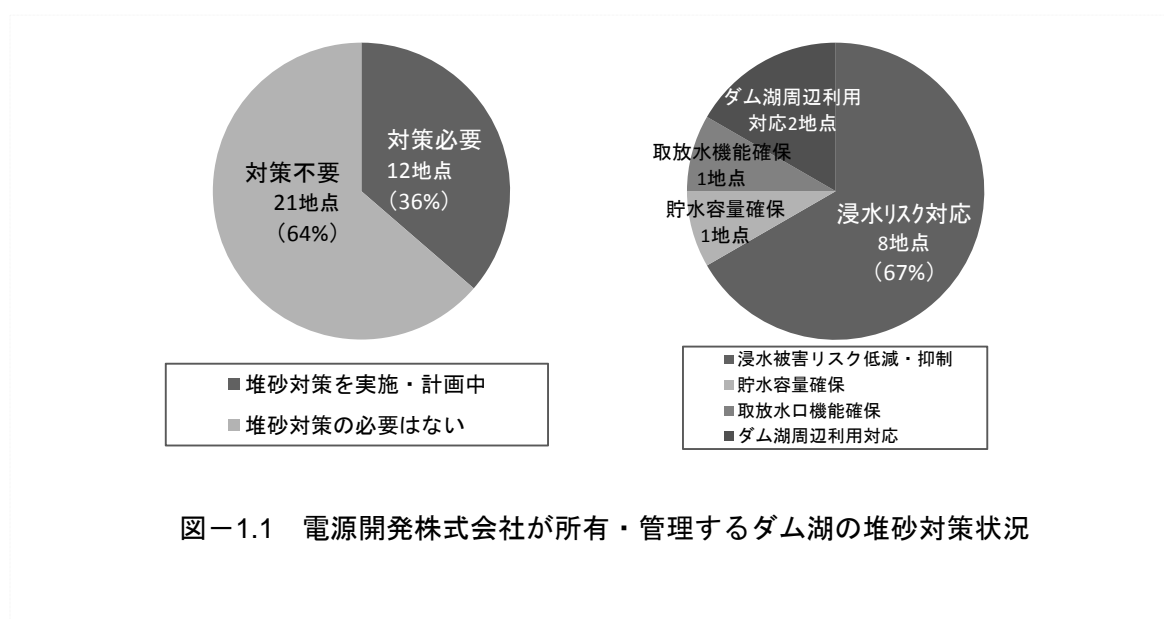
我が国のダム高 15m 以上の約 2,700 基の大ダムの貯水池における 2010 年平均堆砂率は 7.4%である⁶⁾。ダム計画時には、計画堆砂容量を設け、堆砂測量による監視を行うことを堆砂対策としたが、近年、堆砂進行とともに容量設置および監視による対策のみでは不十分となる地点が存在してきている。そのため、掘削、浚渫、貯砂ダム設置、ダム下流土砂還元、フラッシング排砂、流水型ダム、スルーシング排砂、排砂バイパス等、様々な堆砂対策が実施・計画されている。

我が国の水利用に貢献し、維持管理が行われているダムであるが、2001年に長野県知事は「脱ダム」を宣言⁷⁾した。さらに 2009 年に政権が交代すると、「ダム事業原則凍結」の方針を政府は発表⁸⁾した。これらの宣言・発表では、ダムが河川環境に与える影響に強い懸念が示されている。特に脱ダム宣言では、堆砂対策に費用をかけてもいずれ貯水池は埋没することを、脱ダムの理由の 1 つとしている。これは、有効な堆砂対策が実行されていないことを指摘したものと受け取ることができる。

1.2 電源開発株式会社が所有・管理するダム湖の堆砂状況

電源開発株式会社は、全国 33 地点にダム貯水池・調整池（ダム高 15m 以上、貯水容量 1,000 千 m³ 以上）を設置して水力発電を行っている。これらのダム湖の貯水容量を合計すると約 30 億 m³ であり、平成 20 年時点ではそのうち 8.5%にあたる約 2.6 億 m³ を堆砂により失っている。

33 地点のうち堆砂対策を実施、または計画している地点は 12 地点である。そのうち 10 地点において、堆砂対策の主たる目的は浸水被害リスクの低減・抑制である。その他地点の目的は、貯水容量不足解消、取放水口機能確保である。（図－1.1）



図－1.1 電源開発株式会社が所有・管理するダム湖の堆砂対策状況

堆砂対策の主たる目的として、浸水被害リスクの低減・抑制が多くなるのは、治水ダムと比較してダム水位を高め運用する発電用ダム湖の特徴である。また、対策の主たる方法は掘削排除であるが、高水位運用が貯水池末端部に堆砂を進行させることとなり、この貯水池末端部の堆砂排除には機械掘削が適用しやすいことがその理由として挙げられる。また、掘削排除した堆砂は、主として土捨場へ運搬しており、一部は砂利採取業者への引き渡し、ダム湖内死水域への運搬を行っている。

掘削排除、土捨場運搬による堆砂対策は、扱える数量に限界があること、費用が膨大であることのみならず、表-1.2 で示したダム下流における堆砂進行の影響に対して、影響緩和、状況改善にはなり難い。

1.3 ダム湖土砂管理をとりまく情勢の変化

政府は、平成 8 年に「流砂系」という概念を導入し、河川の上流から下流方向の流砂の連続性を考慮した総合的な土砂管理を打ち出した⁹⁾。平成 9 年には河川法が改正され¹⁰⁾、その中で「総合土砂管理」がうたわれた。これを機に、ダム湖の堆砂対策は、計画堆砂の考え方から、河川における土砂移動の連続性を重視する考え方へ明確に変換していくこととなった。

応用生態学と河川工学の研究者により、ダムによる土砂連続性の遮断が下流に及ぼす影響についての研究が進められている¹¹⁾¹²⁾。その結果、山地で生産され供給される土砂をダム湖内に貯めるのではなく、ダム下流へ供給していくことが望ましいとする認識が、ダム・河川・海域等の関係者の間で共通のものとなってきた。

我が国の多くのダム湖は、設置から数十年程度を経過した。ダム湖の堆砂対策・土砂管理については新たな時代に入りつつある。従来からの掘削・浚渫といった一時避難的な対策ではなく、ダム湖に流入してくる土砂を極力下流に通過させるという、「堆砂させない」方法が望まれるようになってきている。ダム計画時の計画堆砂の考え方、掘削・浚渫による対策では、ダム湖内に堆砂した土砂をどのように扱うかに主眼をおいてきたが、その考え方を変換する時期にきている。

1.4 研究の目的

本研究の目的は、既設水力発電設備を持続的に使用していくにあたって、最重要課題であるダム湖の堆砂対策について、最適な方法を構築・提示することである。最適な方法の構築にあたっては、発電用ダム湖特有の設置方式やダム湖運用があり、それらを分析し結果を活用する。例えば、水力発電設備は、河川に上流の貯水池式発電所が設置され、その下流に調整池式発電所が複数設置される。それぞれの発電所で、ダム湖の目的や運用が異なっているという点¹³⁾、貯水池と調整池ではダム湖周辺の社会資本設備状況の差異があり

堆砂影響が異なっているという点等がある。

化石エネルギーの将来的な枯渇は明らかである。平成 23 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震に伴う原発事故により原子力発電はその将来への不透明さを増大させた。「固定価格買い取り制度 (FiT : Feed-in Tariff)」の施行¹⁴⁾等により注目されている再生可能エネルギーであるが、期待通りに電源の一役を担いうるかは容量の面、安定性の面で確実とはいえない。このような状況の中、再生可能であり、発電過程で地球温暖化ガスを殆ど排出しない、かつ今までに電源として我が国を支えてきた実績を有する水力発電は、もっとも信頼性が高いといえよう。新規に水力開発を進め、現在の 3 倍にしようという考えもある²⁾。

今後、原子力が安全性確保を達成し社会の信頼性を得たとしても、新たに大量の化石燃料が確認されたとしても、新規水力開発が大規模に行われたとしても、既設の水力発電設備の必要性が変わることはない。50 年後、100 年後の世代に水力発電用ダム湖の堆砂進行を放置したつけを回さない（世代間の衡平 (Intergenerational Equity)）ためにも、現時点で持続性のある対策を確立し、確実に実行していかななくてはならない。同じく、水力発電設備やダム湖のみならずダム下流の河川・海域の環境についても豊かなものを未来へ残していかななくてはならない。

1.5 論文の構成

第二章では、水力発電を取り巻く情勢について整理し、今後のエネルギー源として水力発電の重要性を述べ、持続的に既設水力発電設備を使用していくために堆砂対策が必要であることを論じる。水力発電を取り巻く情勢については、我が国において水力発電が果たしてきた役割について整理するとともに、気候変動が見込まれること、東日本大震災によりエネルギー情勢が不安定となったこと、再生可能エネルギーの導入等、水力発電に影響する事象について整理する。

第三章では、水力発電用ダム湖における堆砂問題の特徴を整理し、どのような堆砂対策が有効であるかの検討に資する分析を行う。水力発電計画時の堆砂対策、実際の堆砂の状況、対策の実施状況等から現行の堆砂対策の課題を抽出する。そのうえで、水力発電用ダムの設置状況や、貯水池と調整池との間にある、運用の違いに起因する堆砂位置の違い、堆砂進行によるダム湖周辺への影響の違い等を踏まえ、堆砂対策を検討するうえで有用な分析・整理を行う。

第四章では、水力発電用ダム湖のうち調整池における堆砂対策について検討する。調整池を堆砂位置、出水時の水面形状から、3 つのタイプ（池タイプ、川タイプ、中間タイプ）に分け、それぞれに出水時のダム水位低下運用を主とする適用性の高い堆砂対策を提案する。提案した堆砂対策について、河床変動数値解析により物理的有効性を検討し、費用計算・比較により経済性を検討する。さらに、洪水吐の規模とダム湖の土砂捕捉率の関係を整理し、堆砂対策としての洪水吐改造の有効性について論じる。

第五章では、水力発電用ダム湖のうち貯水池における堆砂対策について検討する。貯水池では、堆砂進行が発電運用に影響を及ぼしていることを確認し、その影響を評価・予測する式を作成する。そして、将来に堆砂進行した場合の発電運用への影響について予測する。予測結果から、堆砂対策が必要となる貯水池が抽出され、その対策方法について検討を行う。

第六章では、水力発電設備の設置された河川における総合土砂管理の推進について論じる。水力発電用ダムにおける土砂管理については、総合土砂管理の観点から海までを含む河川流域として適当であることが求められつつある。ダム湖に流入する土砂を流水によってダム下流へ供給する堆砂対策・土砂管理は、その要求に応える有効な方法であるが、適用が進んでいるとはいえない。その理由について、成功例や流域委員会の実施状況等を基に分析を行い、総合土砂管理の推進に向けた方向性を示す。

第七章は、本論文の総括であり、本研究の成果を述べるとともに、本研究が提案する土砂管理方策を適用するうえでの留意点等を取りまとめる。

参考文献

- 1) (財)ダム水源地環境整備センター：ダムの堆砂対策技術ノートーダム機能向上と環境改善に向けてー，2008.
- 2) 鈴木篁：水力発電の底力，ダム工学 Vol.22 No.2，2012.
- 3) 中澤式仁：水資源の科学，朝倉出版，1991.
- 4) World Commission on Dams: DAMS AND DEVELOPMENT-A New Framework for Decision-making-, THE REPORT OF THE COMMISSION ON DAMS, Earthscan Publications Ltd, 2000.
- 5) 中澤式仁：水資源の科学，朝倉出版，1991.
- 6) Gregory L. Morris, Jiahua Fan (Reservoir Sedimentation 研究会監訳、岡野眞久・角哲也訳・監修)：技報堂出版，2010.
- 7) 田中康夫：脱ダム宣言，例えば 2001 年 2 月 21 日信濃毎日新聞，2001.
- 8) 前原誠二：ダム事業原則凍結，例えば 2009 年 10 月 9 日読売新聞，2009.
- 9) 建設省河川局砂防課：河川審議会「総合土砂管理小委員会」報告と今後の取り組み，河川 No.628，1998.
- 10) 国土交通省河川局：河川法および河川法施行令改正，平成 9 年 6 月，1997.
- 11) 芦田和男，江頭進治，中川一：21 世紀の河川学ー安全で自然豊かな河川を目指してー，京都大学学術出版会，2008.
- 12) 池淵周一，角哲也，竹門康弘ら：ダム下流生態系ーダムと環境の科学 I ー，京都大学学術出版会，2009.
- 13) 千秋真一：発電水力演習，学献社，1967.
- 14) 経済産業省資源エネルギー庁：再生可能エネルギーの固定買取制度について，平成 24 年 6 月 18 日 News Release，2012.

第二章 水力発電をとりまく情勢

本章では、水力発電をとりまく情勢について整理し、持続的に既設水力発電設備を使用していくことの重要性を論じる。

我が国の電力供給は、水主火従型から始まって、昭和40年頃に火主水従型へ変化してきたが、その中で水力発電の役割がどのように変化してきたかを整理する。また、気候変動、自然現象の峻烈化、東日本大震災後の原子力依存の見直し等、水力発電をとりまく情勢は変化しており、今後、さらに変化していくことが見込まれる。水力発電は、これらの変化に対応していくべき運用面での役割があるとともに、設備としては発電機能を維持管理して持続していかなくてはならないという二つの使命がある

2.1 我が国の電力エネルギー事情

我が国におけるエネルギー源別の発電設備容量および発生電力量の経年変化は、図-2.1および図-2.2に示すとおりである¹⁾。図が示す通り、水力（一般水力および揚水）は設備出力で約20%、発生電力量で約10%を占めている。揚水式発電を含まない一般水力については、1970年頃から設備容量、発生電力量ともに大きな変化は生じていない。

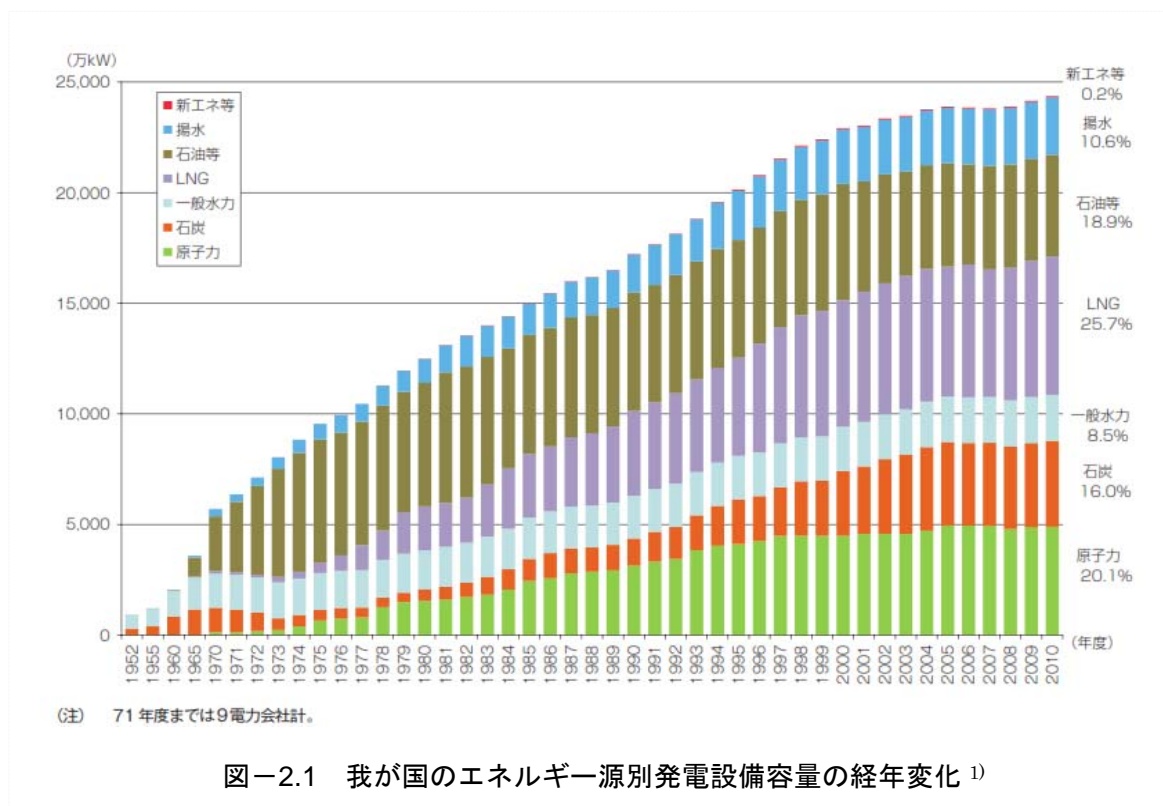
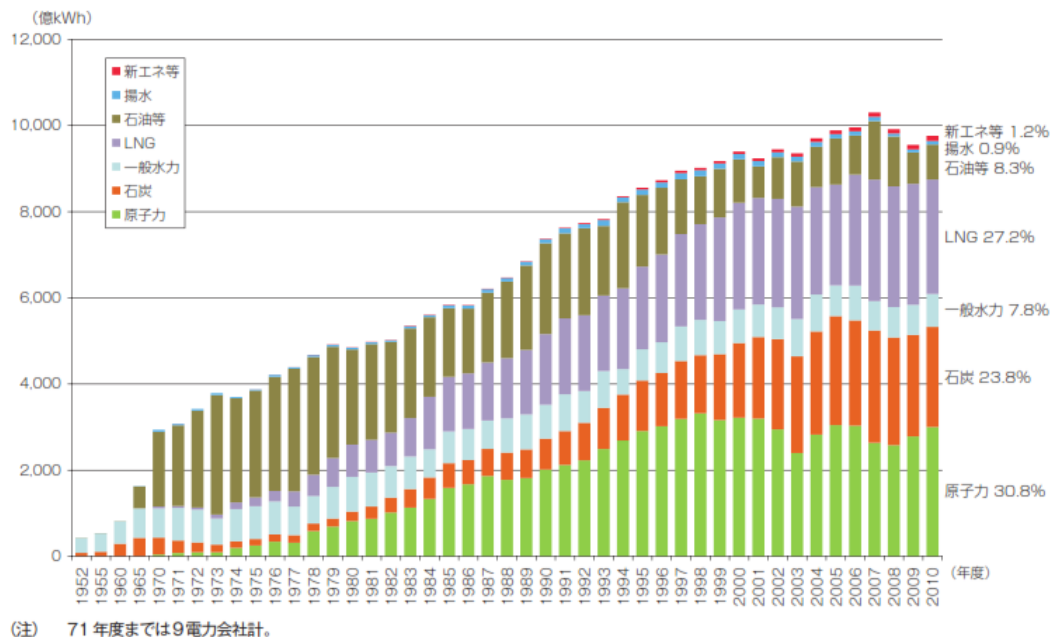


図-2.1 我が国のエネルギー源別発電設備容量の経年変化¹⁾

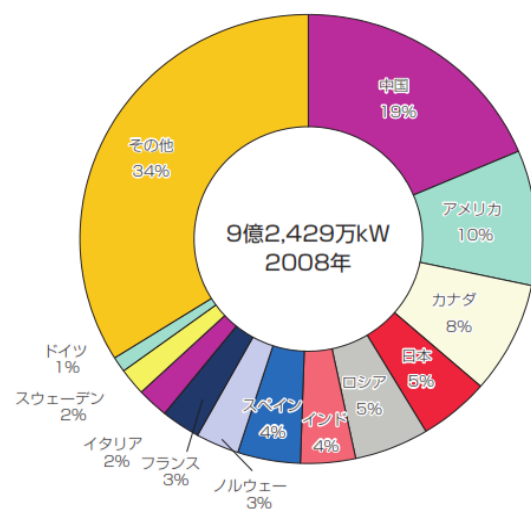


図－2.2 我が国のエネルギー源別発生電力量の経年変化¹⁾

図－2.2 に示す通り、我が国における水力発電による発生電力量が全発生電力に占める割合は 10%程度と小さい。全世界における水力発電による発生電力量の割合は約 16%であり、それと比較しても小さい。このことは、我が国の水力発電が盛んでないことを意味するものではない。我が国は、水力発電以外の火力発電、原子力発電による発電量が多く、相対的に水力発電の割合が小さいからである。我が国の全発生電力を合計した量は、世界第 3 位であり世界全体の約 7%を占める。

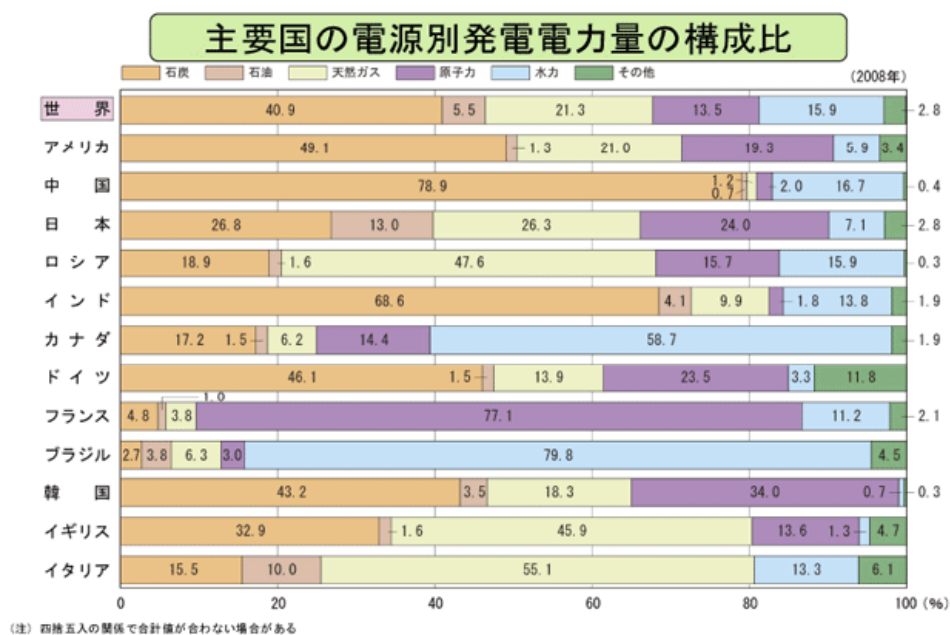
我が国の水力発電の設備容量は図－2.3¹⁾に示す通り、中国、米国、カナダに次いで世界第 4 位である。これは、国土の大部分を山地が占めるという急峻な地形条件、河川勾配が大きいこと、温帯モンスーン気候に属するため降水量が多く水資源が豊富であること、等の水力発電に有利な条件を我が国が持っているためと考えられる。

図－2.4 に主要国における電源別の発生電力量²⁾を示す。我が国の電源は、石油危機後に国が政策³⁾として進めていることもあり、各電源にバランスよく分散している。例えば、2012 年 12 月現在、我が国では原子力発電所がほぼ全て停止している状態であるが、直ちに電力危機とならないのは、国民の節電への協力もあるが、国策により偏った電源に頼っていないからである。例えば、フランスにおいて原子力危機、中国・インドにおいて石炭不足が生じた場合、それを補う電源の確保は難しい。



(注) ドイツ、ノルウェー、インド及び世界計は2007年、スペイン、イタリアは2009年の値。

図－2.3 世界の国別水力発電設備容量¹⁾



(注) 四捨五入の関係で合計値が合わない場合がある

出典:「原子力・エネルギー」図面集2012 4-2-2

図－2.4 世界の国別発生電力量電源構成²⁾

我が国のエネルギー自給率³⁾は、図-2.5 に示す通り 1960 年には 60%程度であったが、1960 年代の水主火従から火主水従型のエネルギー構成に移行する中で大きく低下した。この間に、国内では急激に電力需要が増加し、海外から輸入する化石燃料に依存する火力発電所が多く設備導入された。その結果、エネルギー自給率は、1980 年に 10%以下まで低下し、2000 年以降は 4%程度となった。我が国で自給しているエネルギー源の内訳を図-2.5 に示すが、水力発電は自給エネルギーの約 30%を占める。このことから、既設水力発電設備に不具合が生じ運用ができなくなった場合や、堆砂進行等により運用効率が低下した場合、直ちに我が国のエネルギー自給率の低下につながる事が分かる。よって、我が国がエネルギー自給率を維持していくためには、既設水力発電設備を確実に管理し長期的に使用していく必要がある。

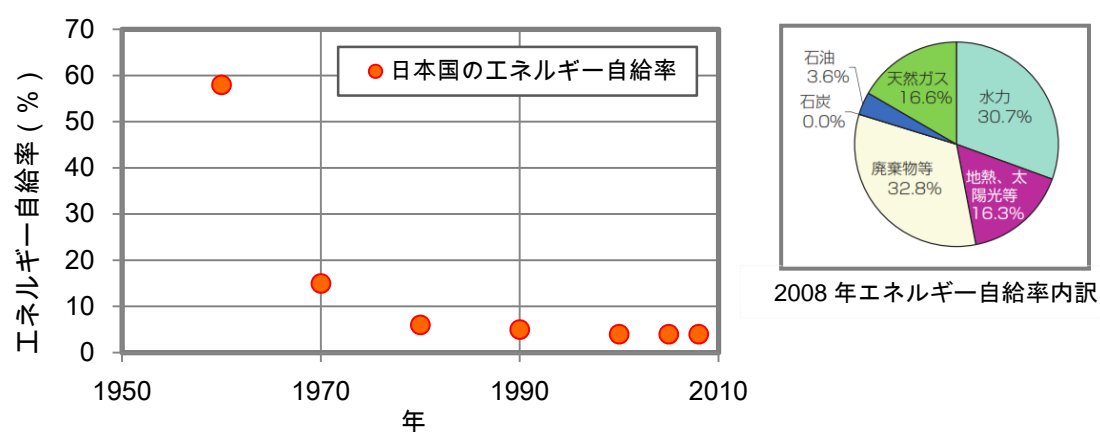


図-2.5 日本のエネルギー自給率および内訳 (2008 年)³⁾ ※原子力を含まず

2.2 我が国における水力発電の役割

現在の我が国における日間のエネルギー源の構成は、図-2.6 に示す通り⁴⁾である。ベースロードを主に原子力発電と石炭を中心とした火力発電が担い、ピーク等の負荷変化分を水力発電と一部の火力発電とが担う。電力需要は、季節ごと、日間ごとに需要に大きな差があり、また分や秒の単位でも変化している。この差や変化に対し、エネルギー源をうまく組み合わせて電力供給を行っているわけであるが、水力発電は、発電機の起動・停止、出力の調整が容易に行えることから、このような需要の差や変化に対応することに適しており、水力発電の持つ大きな長所の1つとなっている。

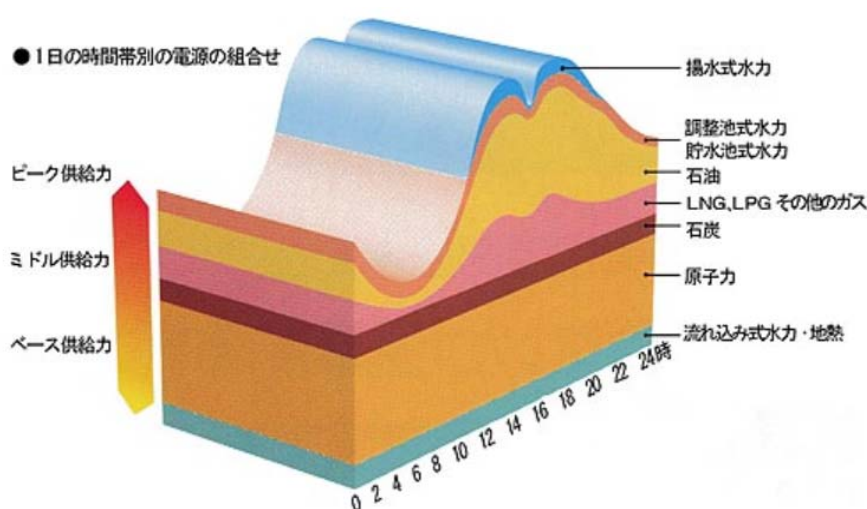


図-2.6 日本のエネルギー源構成（日間）⁴⁾

我が国における水力発電の役割は、エネルギー需要や技術の発展とともに変化してきた⁴⁵⁾。我が国の水力発電は1880年代の後半に、石炭による火力発電に代わる経済的な発電方式として登場した。1888年に仙台電燈の三居沢発電所（最大出力140kW）、1891年に京都市営の蹴上発電所（最大出力80kW）が運転を開始し、これらは水力発電の草分け的存在であり、現在でも運転されている。この頃の水力発電の殆どは流込式で、小規模の取水ダムが取水水位安定のために設置されていた。1900年頃になると遠距離送電を可能とする高圧送電技術が発達し、山間部に大きなダムを設置し河川水を貯水して発電を行う方式へと移行していった。

1960年頃まで半世紀に亘って水主火従の時代であった。水主火従の発電方式においては、水力発電がベースロード、火力発電がピークロード等の変動分を担った。この水力と火力の補完体制は経年とともに整えられていき、水力発電は河川が渇水時でも安定して利水できるよう、大きなダム湖が必要とされるようになった。よって、当時の水力発電計画は最大取水量を平水量程度に設定し、ベースロードとしての役割を担うことが求められた。

1960年代に入ると、高度経済成長下で都市化が急速に進み、全体の電力需要・供給が増加する中で、従来は冬期の夕方に記録していた年間の最大電力が夏期の昼間に移行した。このような夏期ピークでは昼間ピークの先鋭化という新しい電力需要形態が発生した。水主火従時代にベースロードを担う目的であった水力が、これらの変化に対応してピークロードを担うようになった。一方、電力需要・供給が増加する中で、建設費が安く高出力が得られる火力発電所が次々と建設された。また、500m級の落差に耐えられる水圧鉄管や大容量の可逆式ポンプが開発され、ピークロードに対応する揚水式水力発電所も多く建設された。揚水式水力発電は、電力需要が小さくなる深夜に火力・原子力による電力を利用して、下池から上池に水をくみ上げ、昼間の電力ピーク時に上池から下池に水を落として発電する方式である。

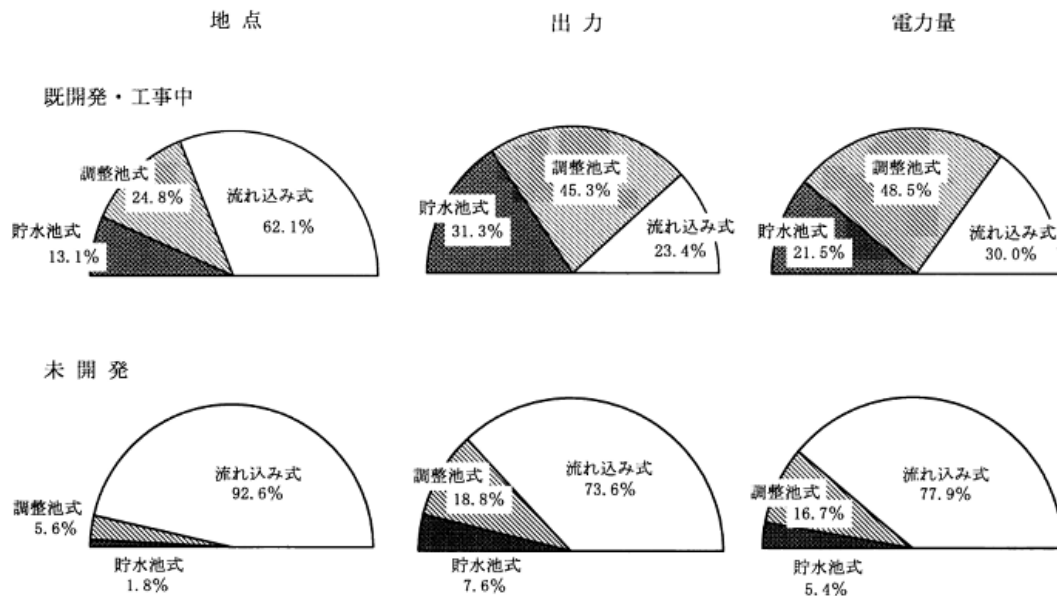
1990年代に入ると、電力需要の伸びが停滞したこと、人々の環境意識が高まり新たに大規模なダム湖や発電・送電設備を山間部に設置することが難しくなったこと等から、新たな水力発電プロジェクトは少なくなった。

今後の我が国における新規の水力発電開発については、発電容量 10,000kW 以下クラスの設備が中心となる。既開発の水力発電設備と未開発の水力発電設備の比較を表-2.1⁴⁾および図-2.7⁶⁾に示す。表から、まだ多くの水力地点が未開発であり、工事中と合わせると既開発分の半分程度の電力量の増加が期待できることが分かる。大規模な設備容量を期待できる地点は少ないものの、比較的小規模な設備で大きな電力が得られる地点となるよう工夫していくことが重要である。これらの地点では、自然環境への影響を小さくすることも大事である。個々の出力は小さいものの、これらを合計すると現状水力発電設備容量を約 50% 向上させることができ、エネルギー自給率の向上につなげることができる。鈴木篁氏は、「日本の残存水力は小規模で奥地化しコストが高く期待できない、との声が聞こえて久しいが、北海道の新冠川、静内川での開発実績もあり開発可能である。」と指摘⁷⁾している。

既設水力発電設備の多くが、建設・運転開始から 50 年程度を経過した。再生可能であり発電過程で地球温暖化ガスを殆ど排出しないクリーンなエネルギー源として、新規の開発と同等に既設水力発電設備も重要である。これらの既設水力発電設備を確実に維持管理し、持続的に使用していくことは電力供給計画に重要であり、その中でダム湖における堆砂対策・土砂管理は大きな課題である。

表－2.1 水力発電の既開発地点と未開発地点との比較⁴⁾

出力区分 (kW)	既 開 発			工 事 中			未 開 発		
	地点	出力 (kW)	電力量 (MWh)	地点	出力 (kW)	電力量 (MWh)	地点	出力 (kW)	電力量 (MWh)
1,000未満	474	203,462	1,268,665	8	1,297	29,578	371	242,190	1,218,611
1,000～ 3,000	417	744,930	4,181,420	9	17,570	95,715	1,232	2,262,500	9,193,048
3,000～ 5,000	166	625,415	3,312,857	2	6,700	30,846	523	1,961,900	7,887,463
5,000～ 10,000	287	1,941,550	10,028,377	4	29,500	147,897	340	2,287,800	9,174,150
10,000～ 30,000	363	6,036,800	27,939,264	6	90,500	367,799	209	3,313,000	12,331,126
30,000～ 50,000	91	3,466,800	15,238,149				21	801,900	2,610,500
50,000～ 100,000	64	4,189,990	16,398,316	1.	61,800	521,726	14	879,100	2,353,400
100,000 以上	26	4,643,300	13,628,309	2.	543,000	850,077	3	378,000	1,109,000
計	1,888	21,852,247	91,995,357	32	750,367	2,043,638	2,713	12,128,390	45,877,298
平均		11,574	48,726		23,449	63,864		4,470	16,910



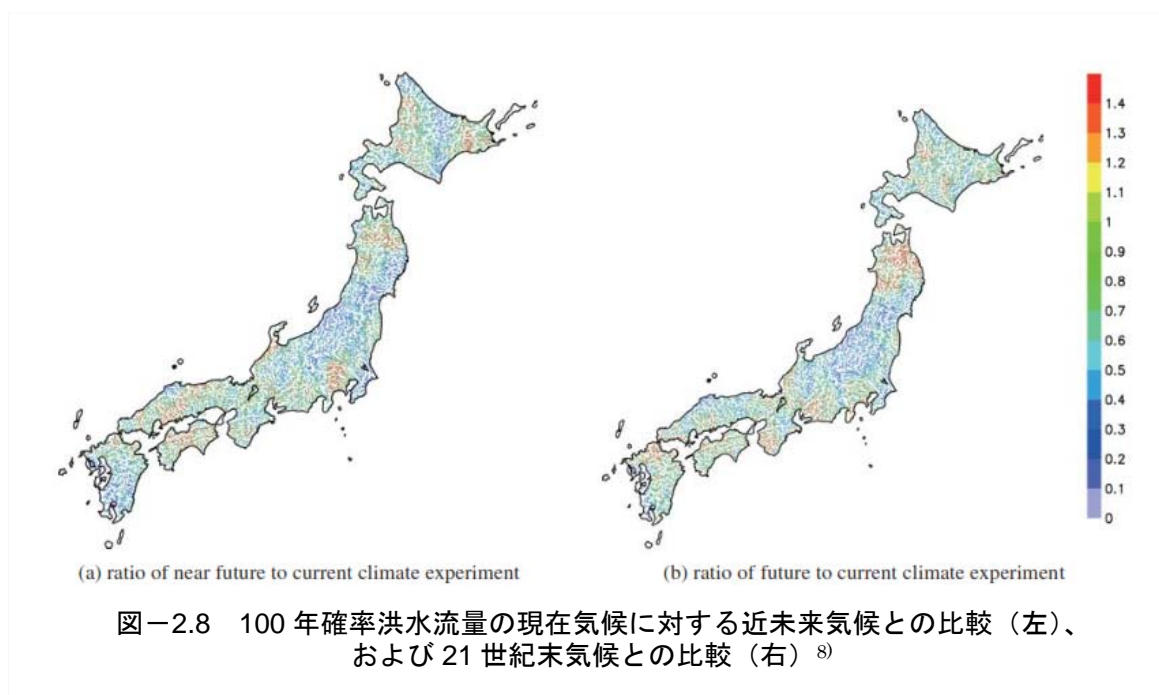
図－2.7 水力発電の既開発・工事中地点と未開発地点との比較⁶⁾

2.3 気候変動が予想される中での水力発電のあるべき姿

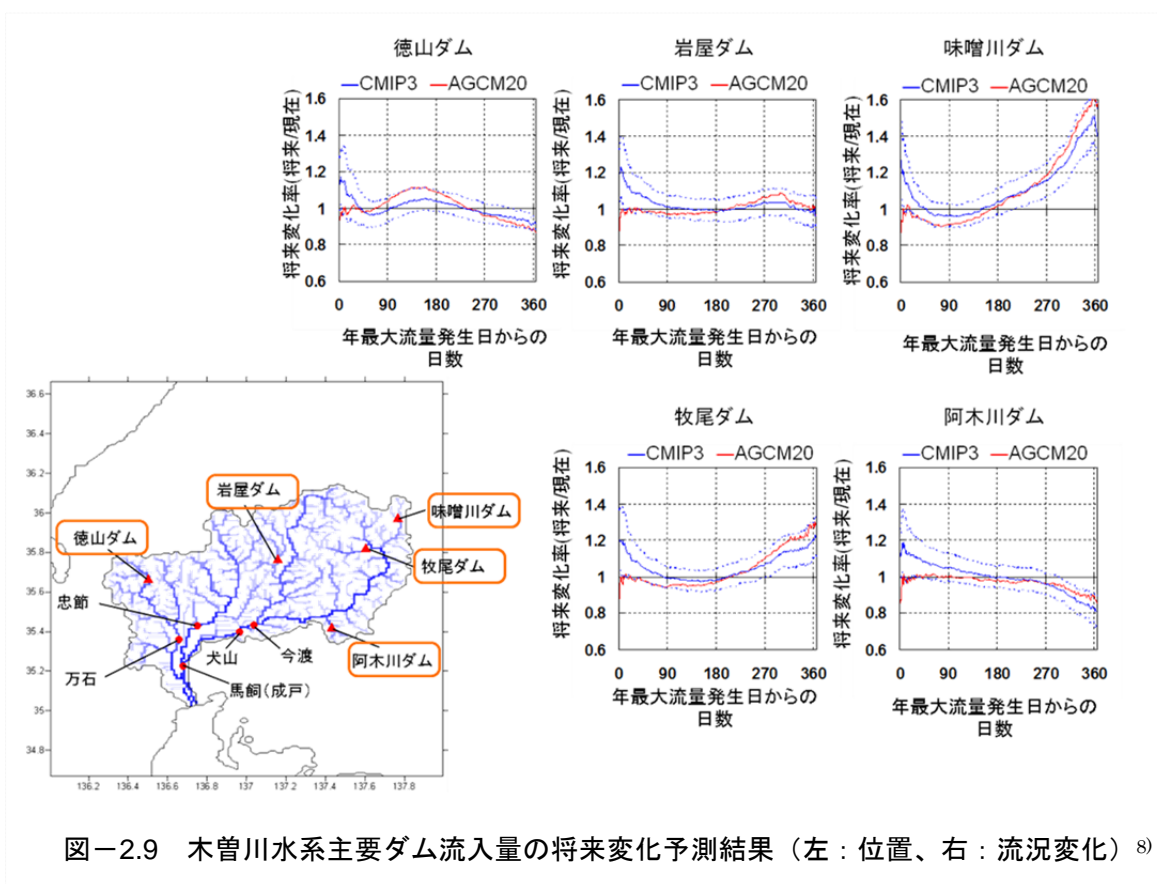
文部科学省による「超高解像度大気モデルによる将来の極端現象の変化に関する研究」の報告⁸⁾によると、今後の気候変動にともなって、日本国内の各地方における河川流況が変化していくとされている。

報告では、「水工施設が高度に流況を制御している我が国の河川流域では、温暖化時の治水・利水リスク評価を行う際に、河川流況の変動を分析した上で温暖化が当該地点の治水や利水に及ぼす影響を分析することが必要である。」としている。水力発電設備は、上流に貯水池、その下流に複数の調整池を設置して、ダムにより貯えた水と落差を無駄にすることなく効率的な利水を達成している。さらに、過去の流況データを分析・評価し、最適な貯水池運用方法を策定して、高効率の利水を図っている。これらのことは、まさに高度に流況を制御（貯水・水利用）しているといえる。よって、将来の温暖化による流況変動に対応して、貯水池運用を変更策定する、または貯水容量を維持・管理していく等の対策が必要である。

報告では、河川流況の変動に関して、現在の流況と近未来および 21 紀末における流況予測との比較を行っている。100 年確率洪水について比較が行われた結果を図－2.8 に示す。21 世紀末気候では、東北地方北部、東海地方、近畿地方、九州地方北部で 100 年確率洪水量が大きくなる傾向が見られる。逆に東北地方南部では、温暖化の進行に伴い積雪量が少なくなり、融雪出水の流量が平準化されるため、100 年確率洪水量が小さくなる傾向が確認できる。



さらに報告では、木曽川流域を対象として、設置されている各ダム地点における流入量の将来流況予測を行っており、その結果を図-2.9に示す。最大流入量から豊水量までの範囲において、変化率が1を超えて流量が大きくなるものが多い。この結果は、図-2.8での東海地方の将来の100年確率洪水量が大きくなるという予測結果と整合する。渇水量等を含む水が少ない期間の流量が、予測対象の5つのダム地点のうち3つで予測されている。このように、出水時流量が大きくなり、渇水時流量が小さくなる傾向は、今後、利水ダムにおける貯水や水利用が困難になっていくことを示唆するものである。



発電用ダム湖においては、将来の気候変動にともなって流況が変化した場合、貯水および利水に影響が出ることが予想される。出水時にはダム放流量が増え、渇水時には使用水量を絞ることになる。これに対しては、運用方法の高度化による対応、発電機の更新による使用水量の増加等の設備改造による対応が考えられる。どちらにせよ、ダム湖の貯水容量を確保していくことが前提条件であり、そのためには堆砂対策が必要である。さらに、流況変化に伴って流入土砂量も長期的に変化することが見込まれ⁹⁾、その変化を踏まえた、堆砂対策とする必要がある。

2.4 東日本大震災を踏まえた水力発電のあるべき姿

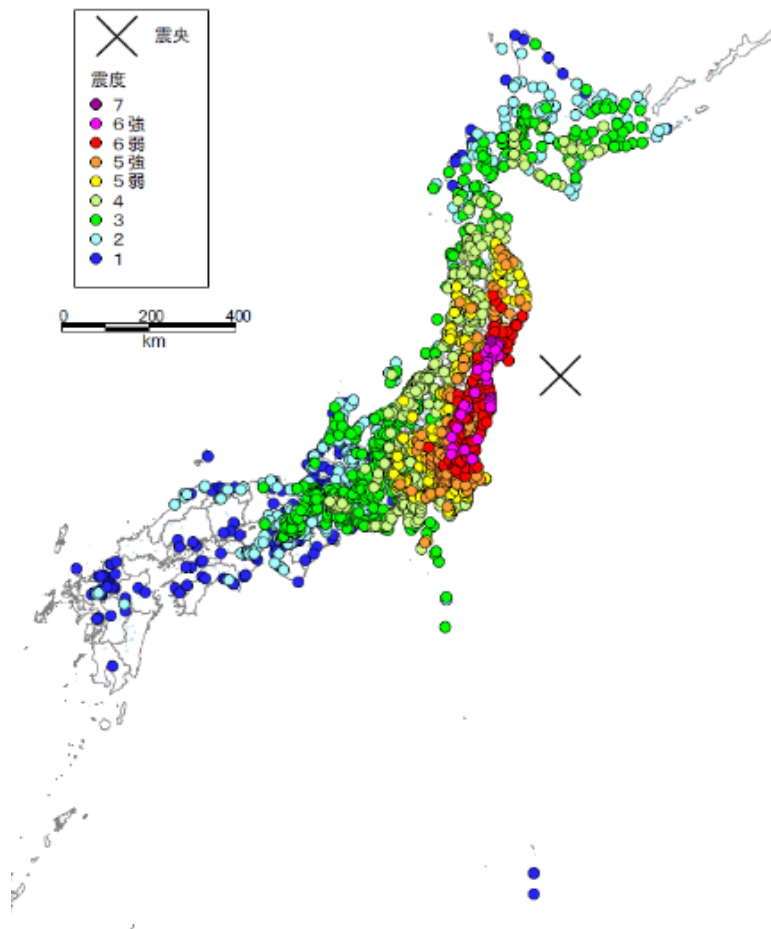
平成 23 年 3 月 11 日 14 時 46 分頃、三陸沖の深さ約 25 k m で地震の規模を示すマグニチュード (M) 9.0 の東北地方太平洋沖地震 (以下、「地震」という) が発生した。(表-2.2、図-2.10)。この地震の規模は、これまでに我が国で観測された最大である。この地震により宮城県栗原市で最大震度 7 が観測された。また、宮古で 8.5m 以上、大船渡で 8.0m 以上、石巻市鮎川で 7.6m 以上、相馬で 7.7m 以上などの高い津波を、北海道地方から東北地方、関東地方にかけての太平洋沿岸で観測した。

この地震にともなう津波により、東京電力福島第一原子力発電所は、浸水、電源喪失にともない核燃料の冷却が不能となった。その結果、原子炉融解、水素爆発等が発生し、放射性物質が原子炉外に放出された。このため、発電所周辺の住民は放射性物質の飛散の恐れのない場所に避難を行わざるをえない事態となった。また、日本政府はこの地震による原子力発電所の被害に対応して、中部電力浜岡原子力発電所の停止を中部電力に要請し、中部電力はこれに応じて発電所を停止させた。その他の日本国内の原子力発電所については、発電所周辺の住民や世論に配慮して、定期検査後に再稼働することを各電力会社は見合わせた。この間、東北電力管内の火力発電所が停止していたこともあり、冬期の暖房需要が大きい期間、夏期の電力重負荷期等において、計画停電、電力使用抑制、節電等の措置がとられた。これらの措置により、日本国の企業活動、国民生活に大きな影響が出るとともに、原子力発電、電力会社への不信感が高まった。

表-2.2 東北地方太平洋沖地震 (東日本大震災) の概要 ^{10) 11) 12)}

項 目	内 容	備 考
地震名称	平成 23 年東北地方太平洋沖地震	
発生年月日時刻	平成 23 年 3 月 11 日 14 時 46 分	
震源	三陸沖の深さ約 24 k m	北緯 38 度 06.2 分、 東経 142 度 51.6 分
地震の規模	マグニチュード (M) 9.0	モーメントマグニチュード
最大余震	平成 23 年 3 月 11 日 15 時 15 分、M7.6	
人的被害	死者 15,875 人、行方不明者 2,725 人	平成 24 年 12 月警視庁発表
被災総額	16 兆 9 千億円 (原発事故起因は含まず)	内閣府試算

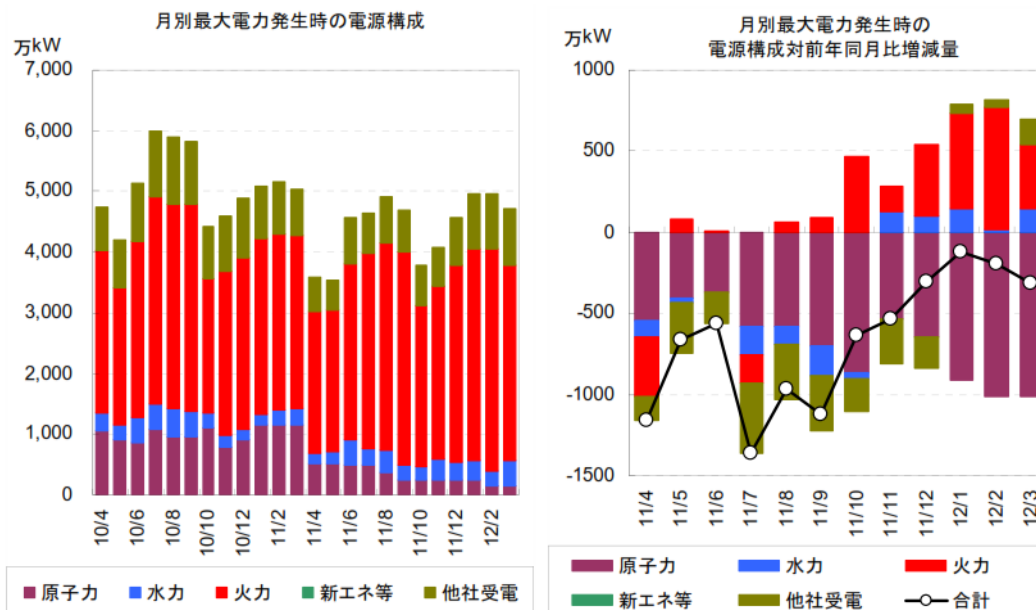
2011年3月11日 14時46分 平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震
北緯：38.0° 東経：142.9° 深さ：約24km（暫定値）M：9.0（暫定値）



図－2.10 東北地方太平洋沖地震の震源および震度分布図 ¹³⁾

東北地方太平洋沖地震により福島第一原子力発電所が被災した。この被災に配慮して、他の原子力発電所は定期点検後に再稼働することを電力各社等が見合わせた。そのため、次々と原子力発電所が停止していくこととなり、平成 24 年 5 月に北海道電力の泊原子力が停止し、国内の全原子力発電所が停止する事態となった。それにともない、国内の電力事情は大きく変わった。

図－2.11 に東北地方太平洋沖地震前後の東京電力管内の月ごとの最大電力負荷時の電源構成を示す。図より、地震後の 4 月に最大電力が大きく減少していること、地震以降に原子力からの発生電力量が減少していることが分かる。平成 23 年夏期は外部電源から調達していたが、その後、原子力発電が定期検査後に再稼働を見合わせたために全国的な電源不足となり、平成 23 年から平成 24 年にかけての冬期には自社の火力発電所により対応していることが分かる。この冬期の最大電力負荷時に水力発電が前年と比較して発生電力が増加していることに着目する。冬期間は流入水量が減少し、全体的には水利用量は小さくな



(出所) 資源エネルギー庁「電力調査統計」より作成

図ー2.11 地震前後の東京電力月別最大電力負荷時の電源構成¹⁴⁾

る季節であるが、例年と異なって一般水力や揚水発電を行ったものと考えられる。揚水式発電は、通常、電力需要が小さくなる夜間に主として原子力からの給電を受けて揚水する。今回のケースでは、原子力からの給電がなされないため、火力発電による電気を利用したと考えられる。揚水式発電は、揚水時の使用電力よりも発電発生電力が小さくなるため、火力を電力高負荷時に増運転する方が効率および経済性は良いが、発電設備の容量が不足したためのやむを得ない措置である。しかしながら、このような措置は、揚水発電が不測の事態に役にも立つ設備であることを示したといえる。

東北地方太平洋沖地震により電力供給不安定が生じたものの、国民の節電協力、国策として行ってきた電源分散の国策等が効果を示し、重大な電力不足を生じさせることは無かった。また、地震後には化石燃料の価格が世界的に上昇したが、これに対しても、電源分散の政策が効果を示し、我が国内の電気料金の短期的な著しい上昇につながることはなかった。

水力発電は、再生可能であり発電過程で地球温暖化ガスを殆ど排出しない点で評価されてきたが、今回の地震による電力供給不安定の中では、通常の調整的な役割よりも発電容量として電力供給の安定性を保つ効果を示し、国民生活への影響を小さくするという大きな役割を果たし、その重要性を示したと考えられる。

2.5 再生可能エネルギー導入が進行する中での水力発電の役割

2012 年 7 月から「固定価格買い取り制度 (FiT : Feed-in Tariff)」が施行された。この制度は、再生可能エネルギーの買い取り価格 (Tariff) を法律で定めることにより、再生可能エネルギー普及を促す助成制度である。固定価格制度、フィードインタリフ制度、Minimum Price Standard、電力買い取り補償制などとも呼ばれる。(図-2.12)

固定価格買い取り制度とは、地球温暖化への対策、エネルギー源の確保、環境汚染への対処などの一環として、主に再生可能エネルギーの普及拡大と価格低減の目的で用いられるものであり、設備導入時に一定期間の助成水準が法的に保証されるほか、生産コストの変化や技術の発達段階に応じて助成水準を柔軟に調節できる制度である。適切に運用することにより、費用当たりの普及促進効果が最も高くなるとされる。世界 50 カ国以上で用いられ、再生可能エネルギーの助成政策としては一般的な手法となっている。我が国で固定価格買い取り制度が施行されたことにより、今後、優遇的に導入されることになることが見込まれるエネルギー源は、風力発電、太陽光発電であり、これらは比較的に電力供給を安定的に行うことが難しいものである。

現在、電力需要の変動に対応して、発電機の稼動・停止により供給安定性を確保しているのが水力発電である。原子力発電や、火力発電は負荷追従を機敏に行うことが難しく、主にベース電源としての役割を担っている。水力発電は、起動・停止が容易に素早く行える利点を有していることから、電力供給安定性を保つ役割を担っており、欠かせない電源となっている。

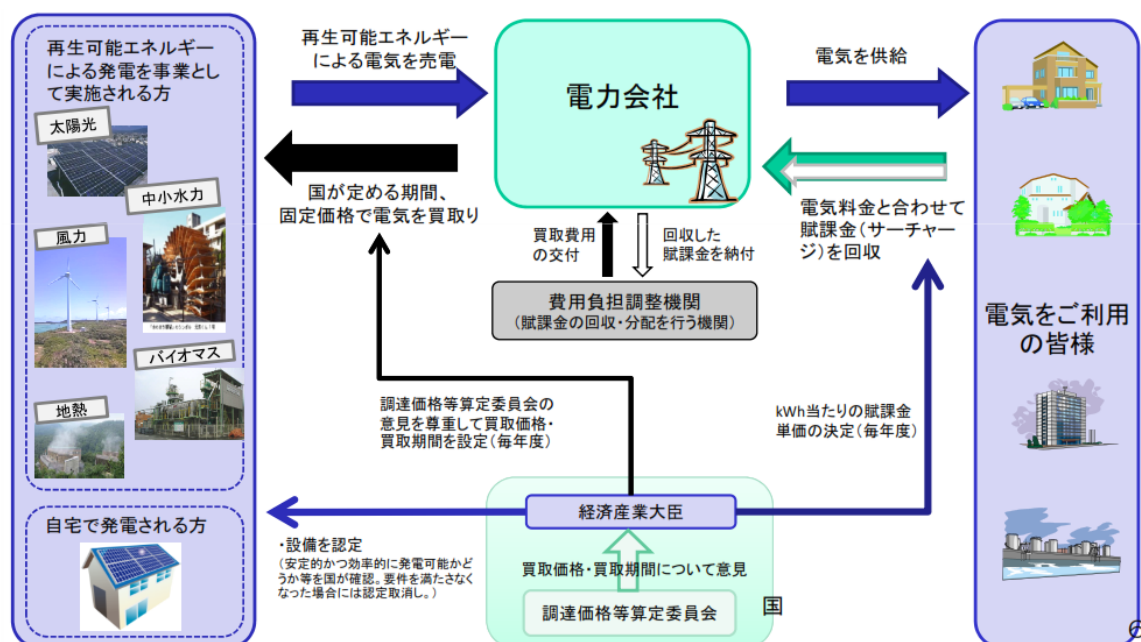


図-2.12 再生可能エネルギーの固定買取制度のしくみ¹⁵⁾

今後、この再生可能エネルギー買い取り制度により、電力供給能力が比較的不安定な風力発電、太陽光発電等が、加速的に導入されていくことが期待されている。再生可能エネルギーの導入は、我が国のエネルギー自給率向上、温暖化対策等のうえで不可欠であり、そういった背景において水力発電はこれらのエネルギー源が持つ不安定さに対応する役割を担う第一の候補である。

欧州では、国境を越えた送電網の整備が進められており、この送電網を利用した再生可能エネルギーの利用拡大が計画されている。EU（欧州連合）は 2020 年までに、EU 全体のエネルギー消費に占める再生可能エネルギーの割合を 20%まで引き上げ、温室効果ガスの排出量を 20%削減することを目標としている¹⁶⁾。風や太陽を利用する再生可能エネルギーの弱点の一つは、発電運用が天候に左右されることであり、現在、その発電運用の振れ幅を天然ガスによる火力発電により調整している国が多い。しかし、この火力発電を用いた調整方法では、温室効果ガス削減の目標達成は難しい。そこで、調整を担う電力として期待されているのがノルウェー国の水力発電である。ノルウェー国の西側地域は降水量が多く、ノルウェー国の消費電力の 99%を水力発電がまかなっている。前述の通り、水力発電は起動・停止を短時間に行うことが可能であり、電力供給の調整に最も適した電源である。整備された送電網を利用して、欧州の広い範囲の電力調整をノルウェー国の水力が担うことが期待されているとともに、デンマーク国やオランダ国の風力発電で発生した電力で、ノルウェー国で揚水を行うことが計画されている。

2.6 水力発電用ダム湖における堆砂対策の必要性

ここまで、水力発電の重要性、必要性について述べた。現時点で、既に水力発電は、再生可能であること、発電過程で地球温暖化ガスをほとんど出さないこと等の貴重な価値を有しており、電力供給においては、安定性確保にその起動・停止の容易さから貢献している。将来的に再生可能エネルギーの導入が進んだ場合においては、さらにその役割は重要性を増すこととなる。このようなことから、新規の水力開発と同様に、既設水力発電設備を確実に維持管理し、持続的に使用していくことも必要である。特に、新規の水力開発が難しい現状においては、既設設備の有効利用は当然のものとして期待されるものとして扱われている。

既設水力発電設備を持続的に使用していくために、維持管理が行われている。発電機や水路等の点検は定期的に行われ、不具合が見つかれば補修や部品交換を行う。最近では、発電機器の発電効率が向上し、発電機を更新することにより発電出力の増加が達成されている地点もある。例えば、電源開発株式会社が保有する田子倉発電所は、平成 16 年から平成 24 年までの 8 年をかけて、水車、発電機、変圧器等の主要設備を全 4 台ともに更新し、その出力を 38 万 kW から 40 万 kW に増加した¹⁷⁾。

その一方、水力発電設備のうちダム湖の堆砂進行に対しては、計画時に採用した計画堆

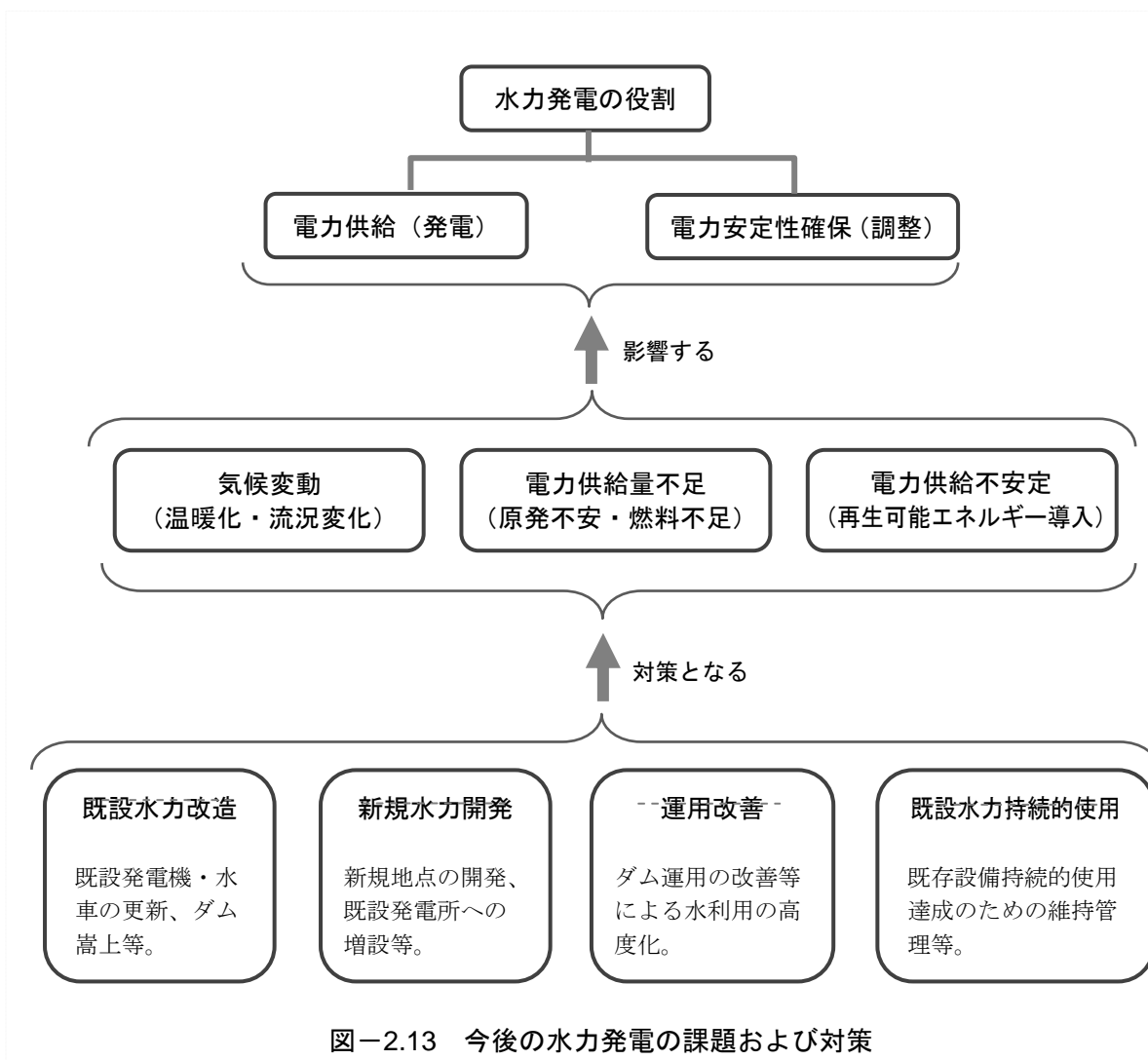
砂の考え方がその前提にあり、発電運用への支障やダム湖周辺社会資本への影響が生じる等の何らかの不具合が生じるまで対策がなされてこなかった。また、堆砂対策が行われた場合でも、緊急的に掘削排除を行う場合が殆どであり、例えば、取放水設備周辺の堆積土砂を排除する、浸水被害リスクの大きい個所付近の土砂排除をする、というものである。毎年、ダム湖に流入し、堆積する土砂の量は膨大であり、ダム湖全体の堆砂量は常に増加し、緊急的堆砂排除は持続的に有効な堆砂対策とはなり難い。

さらに、今後の気候変動により降雨・出水が極端化することが予想されている。水力発電用ダム湖は、極端化して大きくなった出水時の流入量を貯水し、極端化した渇水時にその貯水を利用するという役割を果たす必要がある。このような事態へ対応を考慮すると、現状の貯水容量を維持・管理していく必要があり、そのためには持続性のある効果的な堆砂対策を計画、実施していくことが不可欠である。

このように、水力発電はエネルギー源としての役割を大きく、重要なものと変化させてきている。その一方、ダム湖の堆砂は進行し、周辺社会資本設備への影響のみならず、発電運用への影響が危惧されている。将来の我が国の水力発電、ひいては我が国の経済、国民に影響を及ぼす可能性を有しているダム湖における堆砂進行について、有効な対策方法を計画、実行していかななくてはならない。

2.7 まとめ

2.1 から 2.6 までを総括し、今後の水力発電において生じることが予測される課題およびそれらに対する対策の関係について図－2.13 に示す。



我が国における水力発電をとりまく情勢について述べた。気候変動、大規模地震の発生、原子力利用の不透明さ、供給不安定な再生可能エネルギーの導入促進等、が予想される中で、既設の水力発電設備には当然のものと期待されるエネルギー源としての役割がある。図に示した通り、既設水力発電設備の改造、新規水力の開発、運用改善等も今後のエネルギー供給源として期待されるが、その前提として既設水力発電設備を持続的に使用していくことを踏まえた維持管理により設備機能を維持していかななくてはならない。設備の維持管理・機能維持において、最も大きな課題となっているダム湖の堆砂進行について、次章以降に論じる。

参考文献

- 1) 経済産業省：平成 22 年度エネルギーに関する年次報告（第 179 回国会（臨時国会）提出），2010.
- 2) 電気事業連合会：原子力・エネルギー図面集，2012.
- 3) 天野治：石油ピーク後のエネルギー —EPR（エネルギー収支比）から資源の有効利用を考える—，愛智出版，2008.
- 4) 経済産業省資源エネルギー庁 Web site：資源エネルギー政策の展開 水力発電について，2008.
- 5) 岡野 眞久：日本におけるダムの役割，ダムの役割を考える国際セミナー INTERNATIONAL SEMINAR ON ROLE OF DAMS，2008.
- 6) 経済産業省資源エネルギー庁：平成 19 年度水力開発の促進，2007.
- 7) 鈴木 篁：水力発電の底力，ダム工学 Vol.22 No.2，2012
- 8) 文部科学省研究開発局：超高解像度大気モデルによる将来の極端現象の変化予測に関する研究（21 世紀気候変動予測革新プログラム），2010，2011，2012.
- 9) 河田暢亮、藤田正治：地球温暖化の影響を考慮した貯水池堆砂の進行予測に関する研究，2010 年度河川技術シンポジウム—新しい河川整備・管理の理念とそれを支援する河川技術に関するシンポジウム—，2010.
- 10) 国土交通省気象庁：東日本大震災～東北地方太平洋沖地震～関連ポータルサイト，2011
- 11) 警察庁緊急災害警備本部：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震の被害状況と警察措置，平成 24 年 12 月，2012
- 12) 緊急災害対策本部：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）について—平成 23 年 9 月—，2011.
- 13) 地震調査研究推進本部：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震に関する情報—平成 23 年 4 月 11 日更新—，2011.
- 14) 経済産業省資源エネルギー庁：電力調査統計，2012.
- 15) 経済産業省資源エネルギー庁新エネルギー対策課：再生可能エネルギーの固定買取制度について，平成 24 年 7 月，2012.
- 16) 朝日新聞：フィヨルドの恵み水力自在—欧州からの報告・ノルウェー—，平成 24 年 11 月 28 日夕刊，2012.
- 17) 電源開発株式会社：News Release 田子倉発電所一括更新工事の完了・増出力運転の開始について—平成 24 年 5 月—，2012.

第三章 水力発電用ダム湖の堆砂問題および対策

本章では、水力発電用ダム湖について、その役割や運用方式を示すとともに、堆砂の特徴、ダム湖周辺への堆砂進行の影響、および堆砂対策について論じる。堆砂の特徴、ダム湖周辺への堆砂進行の影響については堆砂状況調査結果を基に、堆砂対策については既往の調査・研究、対策実績を基に分析整理を行う。最後にまとめとして、水力発電設備を持続的に使用していくための対策方法について論じる。

3.1 水力発電用ダム貯水池と調整池

全国に水力発電所は 2,013 あり、そのうち一般水力発電所が 1,969、揚水式発電所が 44 である¹⁾。そのうち 657 の水力発電所がダム高 15m 以上のダムを有している。水力発電所は発電運用方式によって、図-3.1 に示す通り一般水力発電所と揚水式発電所とに分けられ、さらに一般水力発電所は貯水池式発電所、調整池式発電所、および流込式発電所に分けられる²⁾。

これらの水力発電所の役割²⁾は、表-3.1 に示す通りである。貯水池式発電所は台風、梅雨前線の活動、融雪等による季節的な流入水を貯水池に貯留し、流入量の少ない時期に使用することにより季節的な流量の過不足を調節して年間を通じて安定した発電を行う。調整池式発電所は、夜間や週末の流入水を調整池に貯留し、昼間や週中に使用するという日間・週間の流量の過不足を調節して発電を行なう。揚水式発電所は、比較的標高の高い位置に上池、低い位置に下池を設置し、電力低負荷時に原子力等からの余剰電力を利用して下池の水を上池に揚げ、高負荷時に上池の水を下池に導水して発電を行う。揚水式発電は、起動・停止を繰り返しながら、電力供給の安定性を保つ重要な役割を果たしている。流込式発電所は、特に河川水を貯留する設備をもたず、河川の自然流量を調整せずにそのまま利用して発電を行う。よって、電力負荷変動に追従した電力供給はできない。

これらの発電所の設置状況を図-3.2 に示す。

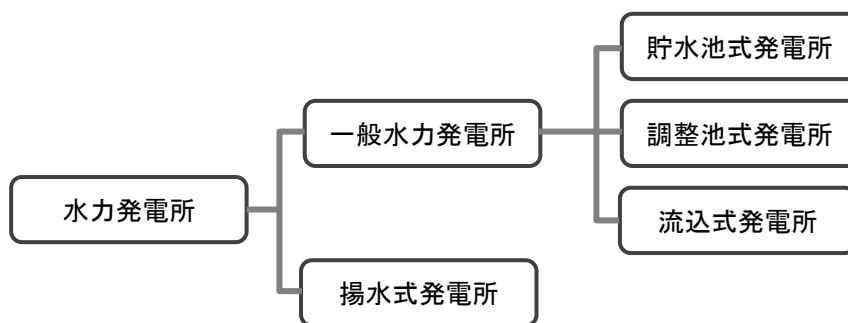
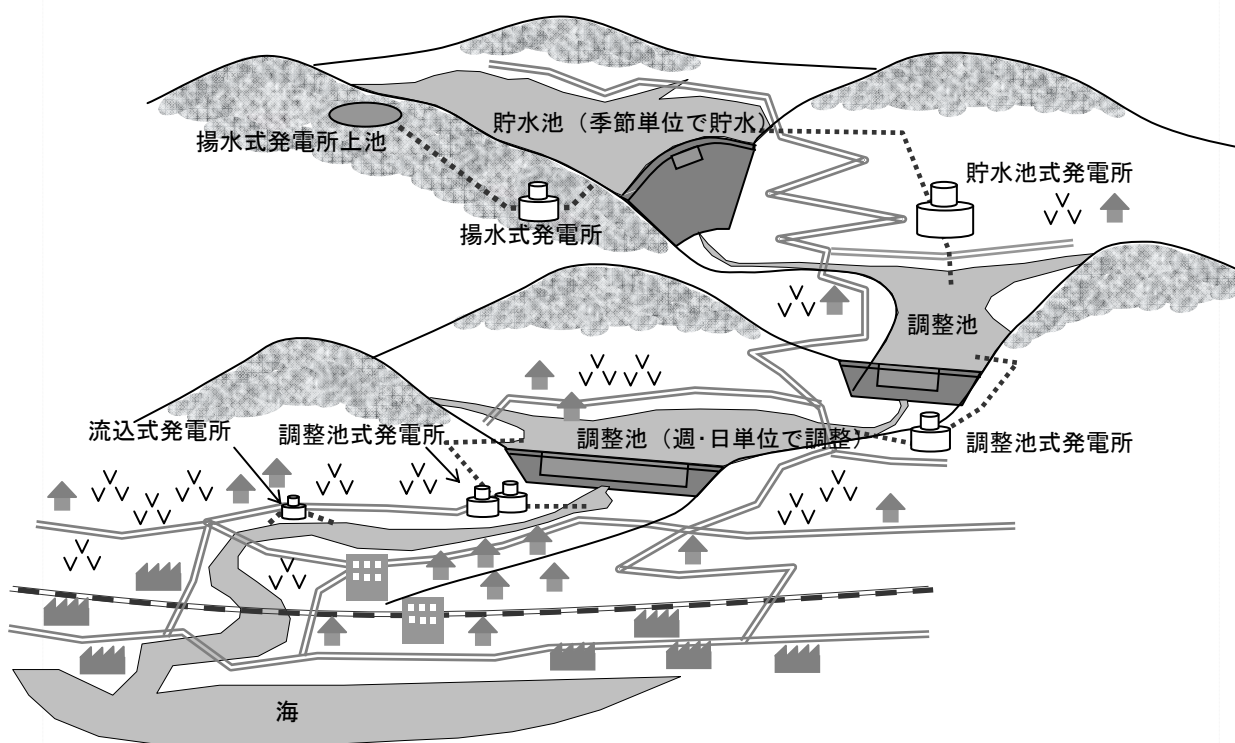


図-3.1 水力発電所の種類²⁾

水力発電所は発電方式によってダム湖の運用や役割は異なる。流込式発電所はダム湖を必要としない。さらに、ダム湖が設置される位置（河川の上流域、中流域、下流域、等）および周辺環境も異なる。よって、水力発電用ダム湖の堆砂対策については、このような発電方式ごとの特徴をよく理解し、それぞれに適した堆砂対策を立案・実施することが効果的であると考えられる。

表－3.1 水力発電所の種類別運用方式・役割²⁾

水力発電所の種類	運用方式・役割
貯水池式発電所	台風、梅雨前線の活動、融雪等による季節的な流入水を貯水池に貯留し、流入量の少ない時期に使用するという季節的な流量の過不足を調節して、年間を通じて安定した発電を行う。
調整池式発電所	夜間や週末の流入水を調整池に貯留し、中間や週中に使用するという日間・週間の流量の過不足を調節して発電を行う。
流込式発電所	特に河川水を貯留する設備をもたず、河川の自然流量を調整せずにそのまま利用して発電を行う。自流式ともいう。電力負荷変動に追従した電力供給はできない。
揚水式発電所	軽負荷時の余剰電力を利用して、ポンプにより下池から上池に揚水し、高負荷時に上池から下池に導水して発電を行う。主に昼間の電力高負荷時に電力供給する。



図－3.2 水力発電所の設置状況

3.2 水力発電計画時における堆砂対策

1958 年に公布された「建設省河川砂防技術基準」³⁾において、ダムを新設する場合には 100 年分の堆砂量に相当する計画堆砂容量をダム湖内に確保する考え方が示された。ダム湖を必要とする貯水池式水力発電所、調整池式水力発電所の建設を計画する場合、この考え方が適用された。集水流域が殆どなく、土砂流入がないとみなせる揚水式発電所上池については、計画堆砂容量は必要ない。1967 年には、既に堆砂問題が表面化し始めたことを受けて、多目的ダムと一部の利水ダム等を対象に堆砂量を調査することが開始された。

1950 年代の後半から 1960 年代にかけて、多くの水力発電用ダムが建設されたが、当時の堆砂対策は計画堆砂容量を設けることであった。以降も、同様に計画堆砂容量を設ける同様の対策方法が採用され続けた。1997 年の「改訂新版・建設省河川砂防技術基準（案）同解説」⁴⁾においても、「ダムの堆砂容量は原則として 100 年間に溜まる推定堆砂量をとるものとする。」と記載されており、その対策方法は継続されている。

電源開発株式会社が所有・管理するダム湖は、貯水池 16 地点、調整池 24 地点、揚水式発電所 4 地点（うち上池ダム湖 3 地点、下池ダム湖 1 地点）であり、それらの竣工年は表－3.2 に示す通りである。表から、水力発電用ダム湖の設置が 1950 年代後半から 1960 年代の間に集中していることが分かる。揚水式水力発電用のダム湖を除くこれらのダム湖には計画堆砂容量が設けられている。

表－3.2 電源開発株式会社の水力発電設備のうち貯水池式・調整池式・揚水式発電所ダムの竣工年

竣工年	貯水池式	調整池式	揚水式	備 考
1945 年～1950 年	0	0	0	
1951 年～1955 年	1	0	0	
1956 年～1960 年	6	6	0	1957 年 ダム設計基準 1958 年 河川砂防技術基準
1961 年～1965 年	6	10	0	
1966 年～1970 年	2	4	0	1968 年 ダム構造基準および同細目
1971 年～1975 年	0	1	1	1971 年 改訂ダム設計基準
1976 年～1980 年	0	1	2	1976 年 河川管理施設等構造令 1976 年 改訂河川砂防技術基準 1978 年 第 2 次改定ダム設計基準
1981 年～1985 年	1	0	0	
1986 年～1990 年	0	2	0	
1991 年～1995 年	0	0	1	
1996 年～2000 年	0	0	0	1997 年 改訂河川砂防技術基準 1998 年 改訂河川管理施設等構造令
2001 年～2005 年	0	0	0	
2006 年～	0	0	0	
合 計	16	24	4	

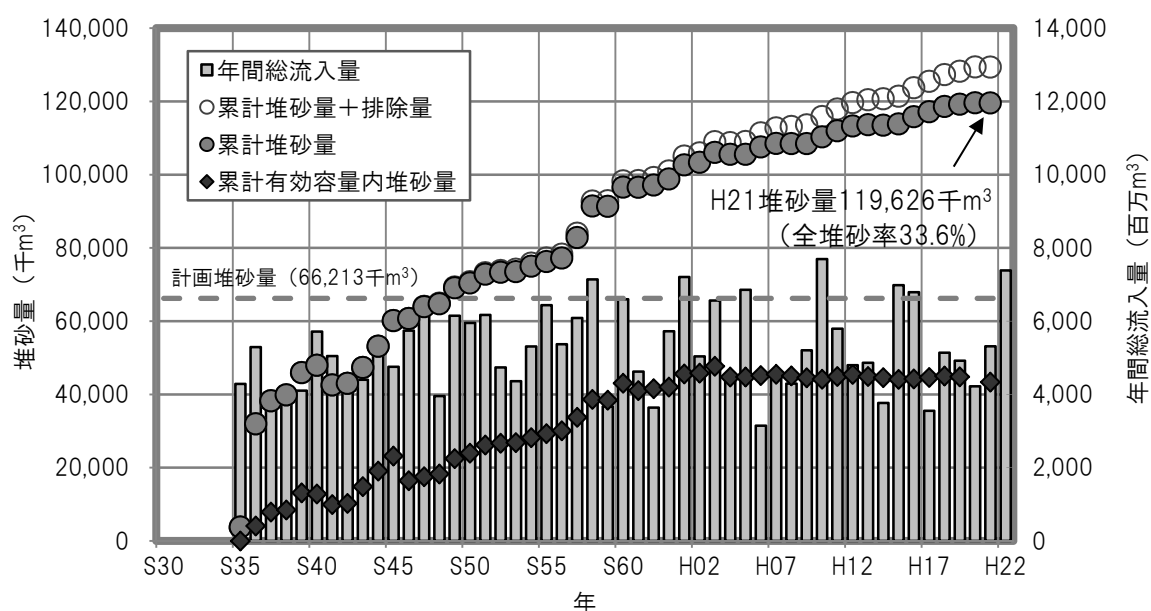
ダム高 15m 未満、総貯水容量 1,000 千 m³ 未満のダムを含む

3.3 貯水池および調整池における堆砂状況

水力発電計画時には、堆砂対策として計画堆砂容量を設ける。ダム竣工後はダム湖内の堆砂測量を行い、堆砂状況を把握する。電源開発株式会社が所有・管理するダム湖のうち、表－3.3 に示す堆砂が進行している、あるいは堆砂対策必要となっている 6 つのダム湖（3 つの貯水池と 3 つの調整池）について、年間総流入量、累計堆砂量および有効貯水容量内累計堆砂量の経年変化、計画堆砂量を図－3.3 から図－3.8 に示す。また、図－3.9 から図－3.12 に年間総流入量と年間堆砂量との関係を示す。

表－3.3 堆砂状況整理対象ダム湖

ダム湖名（地 域）	水 系	発電運用 開始年	当 初 総貯水容量	当 初 有効貯水容量
S 貯水池（中 部）	T 川水系	1956 年	329,848 千 m ³	205,444 千 m ³
K 貯水池（紀伊南部）	S 川水系（T 川）	1960 年	130,000 千 m ³	89,000 千 m ³
F 調整池（紀伊南部）	S 川水系（T 川）	1962 年	43,000 千 m ³	11,000 千 m ³
Y 貯水池（四国南部）	N 川水系	1970 年	104,625 千 m ³	72,500 千 m ³
H 調整池（四国南部）	N 川水系	1960 年	4,420 千 m ³	980 千 m ³
Z 調整池（九州・沖縄）	K 川水系	1958 年	9,930 千 m ³	2,230 千 m ³



図－3.3 堆砂量等経年変化および年間総流入水量（S 貯水池）

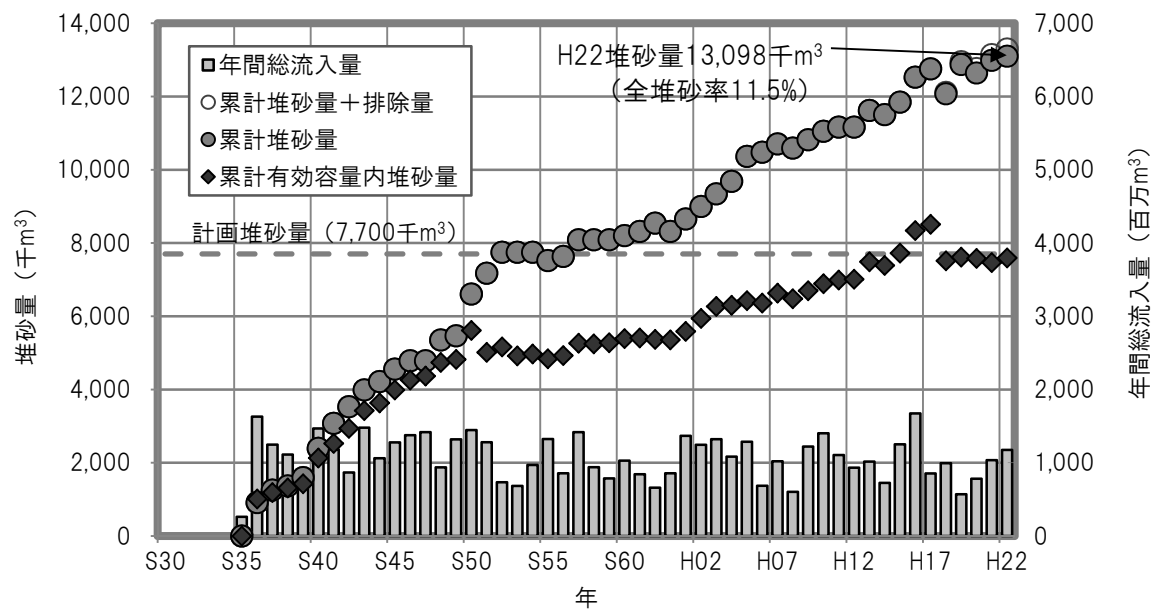


図-3.4 堆砂量等経年変化および年間総流入水量（K貯水池）

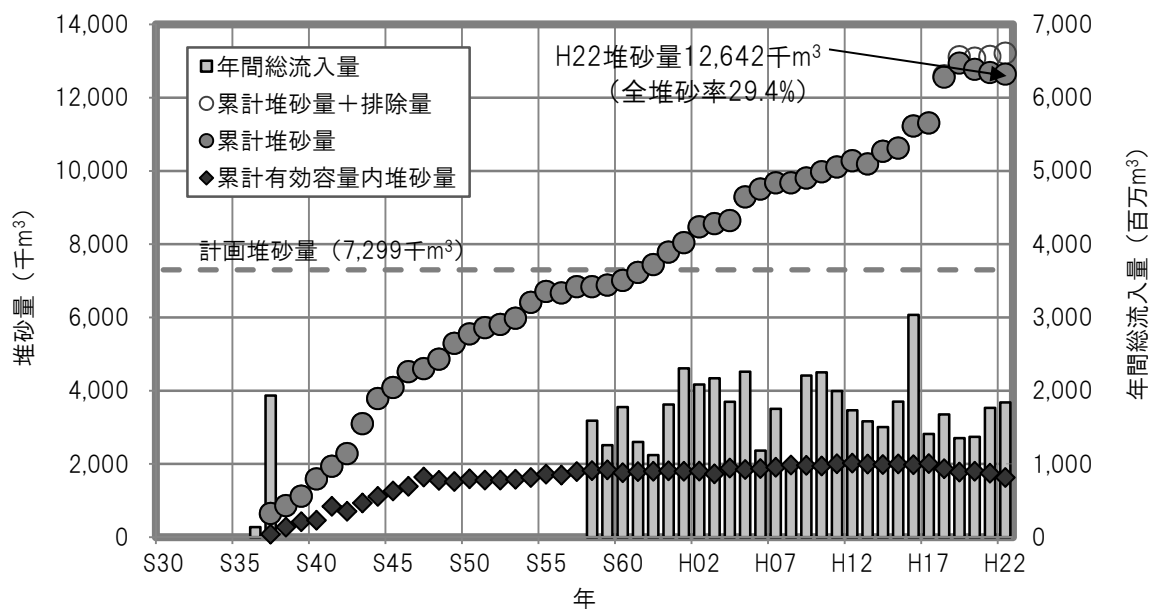


図-3.5 堆砂量等経年変化および年間総流入水量（F調整池）

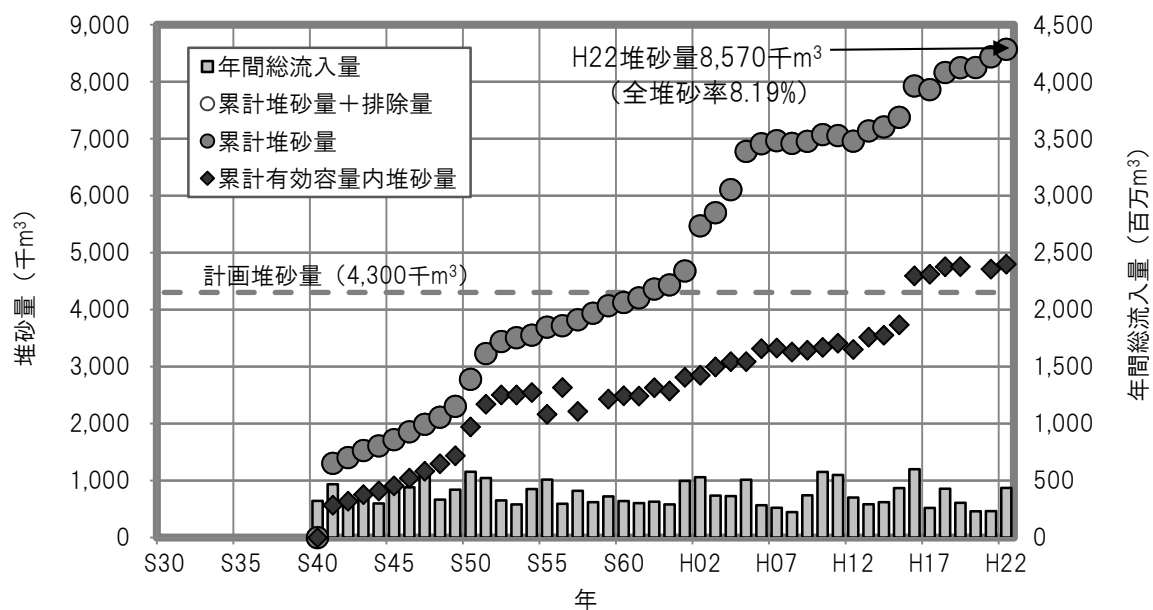


図-3.6 堆砂量等経年変化および年間総流入水量（Y 貯水池）

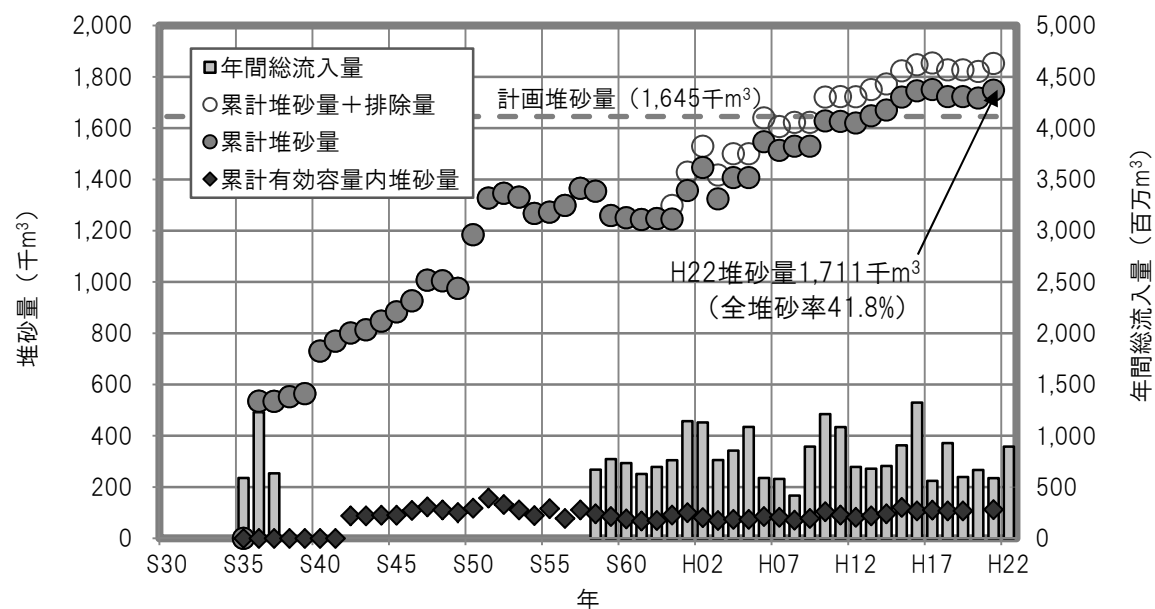


図-3.7 堆砂量等経年変化および年間総流入水量（H 調整池）

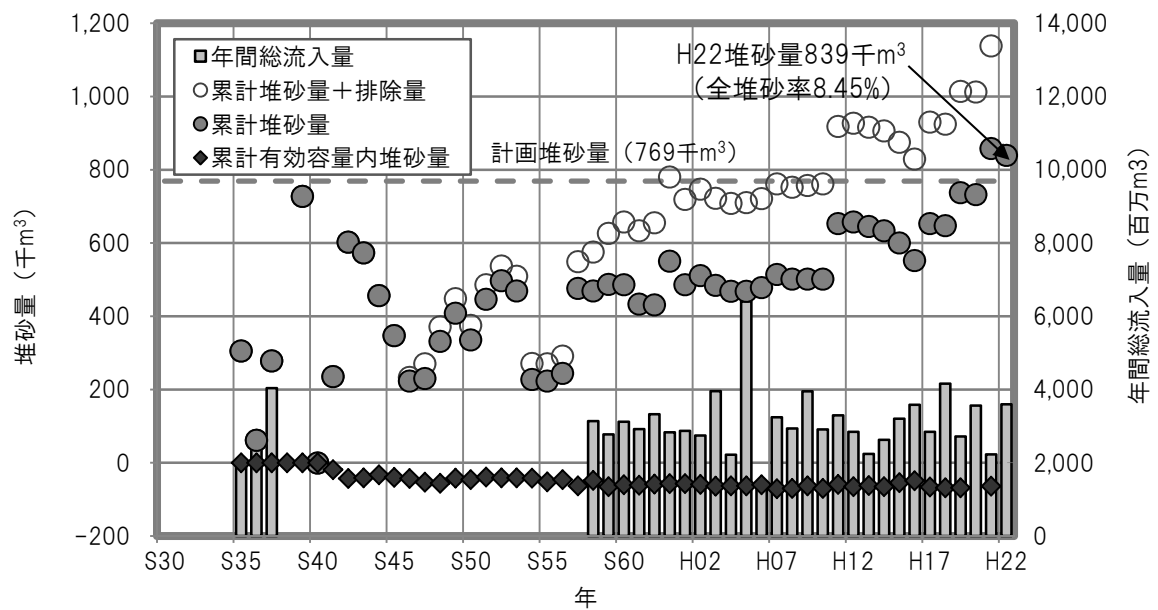


図-3.8 堆砂量等経年変化および年間総流入水量 (Z 調整池)

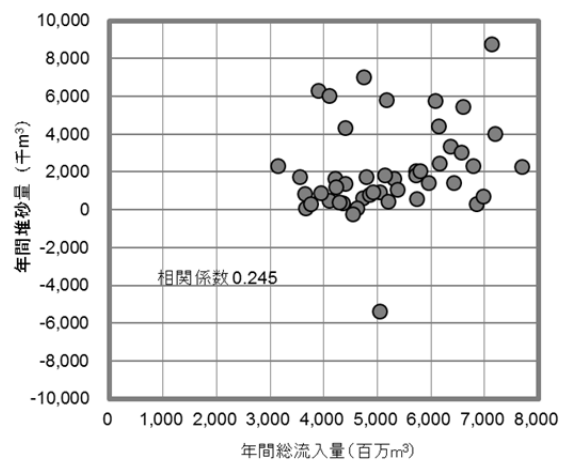
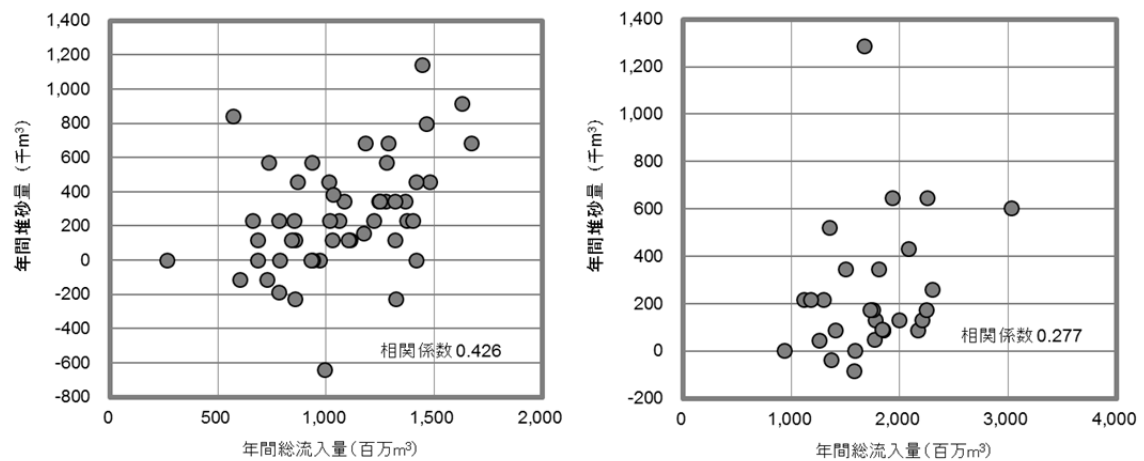
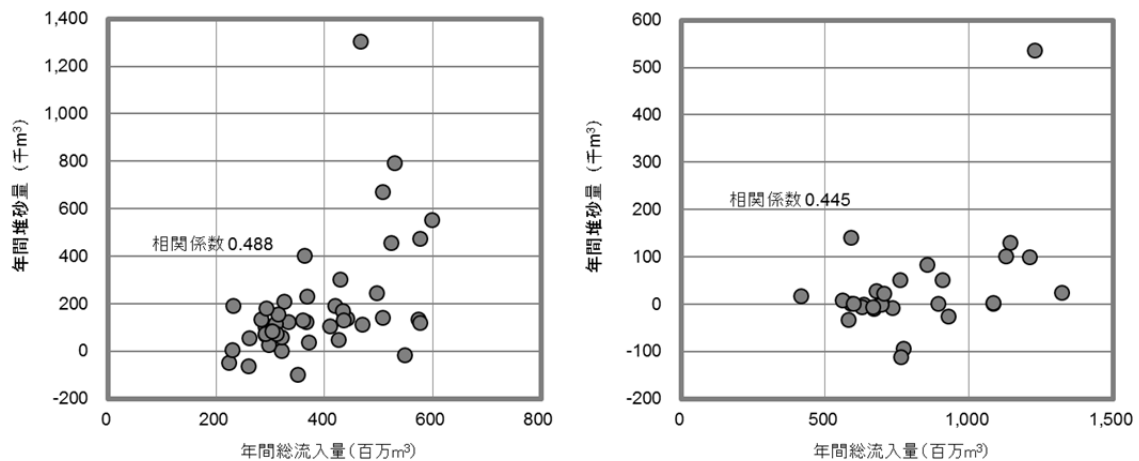


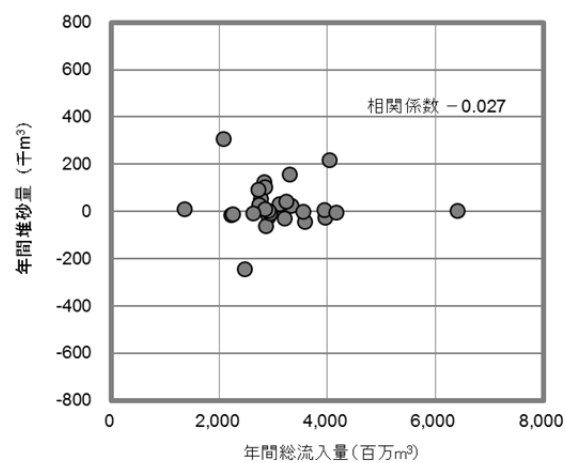
図-3.9 年間総流入量と年間堆砂量との関係 (S 貯水池)



図－3.10 年間総流入量と年間堆砂量との関係（左：K貯水池、右：F調整池）



図－3.11 年間総流入量と年間堆砂量との関係（左：Y貯水池、右：H調整池）



図－3.12 年間総流入量と年間堆砂量との関係（Z調整池）

6つのダム湖の全てにおいて、計画堆砂量を超えて堆砂が進行している。これらの地点では、Y貯水池地点を除いて、河床上昇による浸水被害リスクの低減を目的とした堆砂対策が実施または計画されている。増加する堆砂量が計画堆砂量を超過したことが、直ちに堆砂対策を実施する理由とはならないが、実態としておおよその目安となっていることが分かる。

総貯水容量内の堆砂量と、有効貯水容量内の堆砂量の経年変化には違いがある。さらに有効貯水容量内の堆砂量の経年変化には貯水池と調整池との間に違いがある。総貯水容量内の堆砂量は、比較的経年とともに増加していくが、有効貯水容量内の堆砂は、ある程度の量に達すると増加傾向が小さくなるか、または増減しなくなる傾向がある。貯水池においては、増加傾向が小さくなる傾向があり、調整池では増減しなくなる傾向がある。これは貯水池の方が利用水深は大きく、有効貯水容量が広範囲であることから、ダム湖の比較的深い部分に生じる堆砂が有効貯水容量の減少となるからである。一方、調整池の利用水深は小さく、調整池設置後の比較的早い時期に有効貯水容量内の堆砂がほぼ平衡な状態となり、以降はより深い死水域に堆砂が生じていくこととなる。

なお、図には砂利採取や堆砂対策により排除された堆砂をダム湖堆砂量に足したものを示しているが、現在の堆砂量を大幅に変える程度のものではなく、堆砂の有効利用がダム湖の堆砂進行の抑制に大きく貢献するレベルでないことを示している。通常、砂利採取はダム湖末端付近で行われることが多く、出水被害リスクの抑制にいくらかの貢献をしていることは事実である。Z調整池については、有効貯水容量内の堆砂量が「^{マイナス}ー」となっているが、当初よりも河床が低下し有効貯水容量が大きくなったことを示している。調整池の有効貯水容量内の堆砂については、前述の通り有効利用水深が小さいため、一定量まで堆砂が進行すると堆砂進行が鈍くなるが、Z調整池においては平衡状態となる河床形状が元河床よりも低位であったということである。

年間総流入量と年間堆砂量との関係を図に示したが、表－3.4に相関係数を示す。相関係数は「0～0.20 でほとんど相関が無い」、「0.20～0.40 で強い相関がある」、「0.40～0.70 中程度の相関がある」、「0.70～で強い相関がある」、とされており、実績比流砂量とダム総流

表－3.4 年間総流入量と年間堆砂量との相関

ダム湖名（地 域）	水 系	発電運用 開始年	年間総流入量と年間堆 砂量との間の相関係数
S 貯水池（中 部）	T 川水系	1956 年	0.245
K 貯水池（紀伊南部）	S 川水系	1960 年	0.426
F 調整池（紀伊南部）	S 川水系	1962 年	0.277
Y 貯水池（四国南部）	N 川水系	1970 年	0.488
H 調整池（四国南部）	N 川水系	1960 年	0.445
Z 調整池（九州・沖縄）	K 川水系	1958 年	－0.027

入量との間には、0.22 程度の相関があるという日本大ダム会議による整理結果(資料数 150)がある⁵⁾。S 貯水池における相関係数がおおよそ大ダムの整理結果と整合する。紀伊南部、四国南部の貯水池および調整池では、これよりも相関係数が大きく、ダム湖上流河道に大量の土砂堆積があり、比較的流況に応じたダム湖への土砂流入が生じているものと考えられる。Z 調整池は、ダム高が 26.5m と低く、洪水吐ゲートの高さ（洪水吐クレスト頂から満水位までの長さ）がダム高の半分以上である。よって、出水時には流入土砂や堆積土砂が洪水吐ゲートからダム下流へ通過していると推察され、年間総流入量と年間堆積土砂量との間の相関は小さくなったものと考えられる。

3.4 貯水池および調整池における堆砂等の特徴

電源開発株式会社が所有・管理するダム湖における、堆砂状況、堆砂問題について、貯水池と調整池に分けて整理、分析を行う。なお、揚水式発電所上池ダム湖については、基本的に集水流域を有しておらず、土砂流入が殆どなく堆砂が生じないことから整理・分析の対象から除外する。

3.4.1 貯水池および調整池の総貯水容量および有効貯水容量

貯水池および調整池のうち、1つの河川に連続して存在する12組を対象に、設置当初の総貯水容量および有効貯水容量の関係を図-3.13の通り整理した。有効貯水容量とは電気事業者が使用できる利用水深内の貯水容量のことをいう。貯水池の最大当初貯水容量は601,000,000m³、最大当初有効貯水容量は458,000,000m³である。一方、調整池の最大当初貯水容量は61,112,000m³、最大当初有効貯水容量は11,000,000m³である。

図-3.13 から、貯水容量は貯水池の方が調整池よりも大きく、その程度は、総貯水容量では3倍～100倍程度、有効貯水容量では10倍から200倍程度の比率であることが分かる。両者の比率の違いは、貯水池は利用水深が数十mであり、貯水池の比較的大きな範囲を利用しているのに対し、調整池はダム湖表層の数mのみを利用水深としているためである。調整池は、貯水池と比較して、総貯水容量に対する有効貯水容量の割合が小さい。

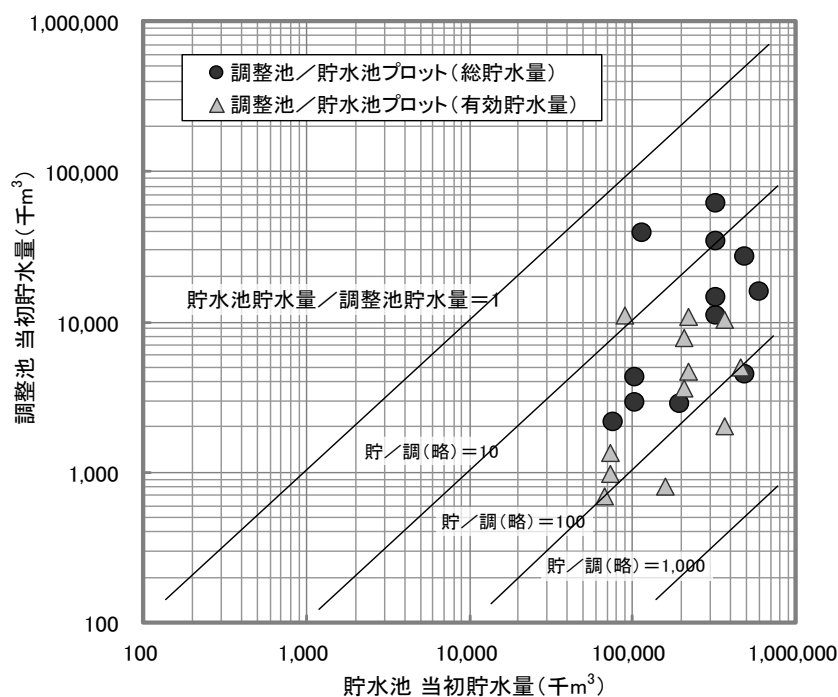
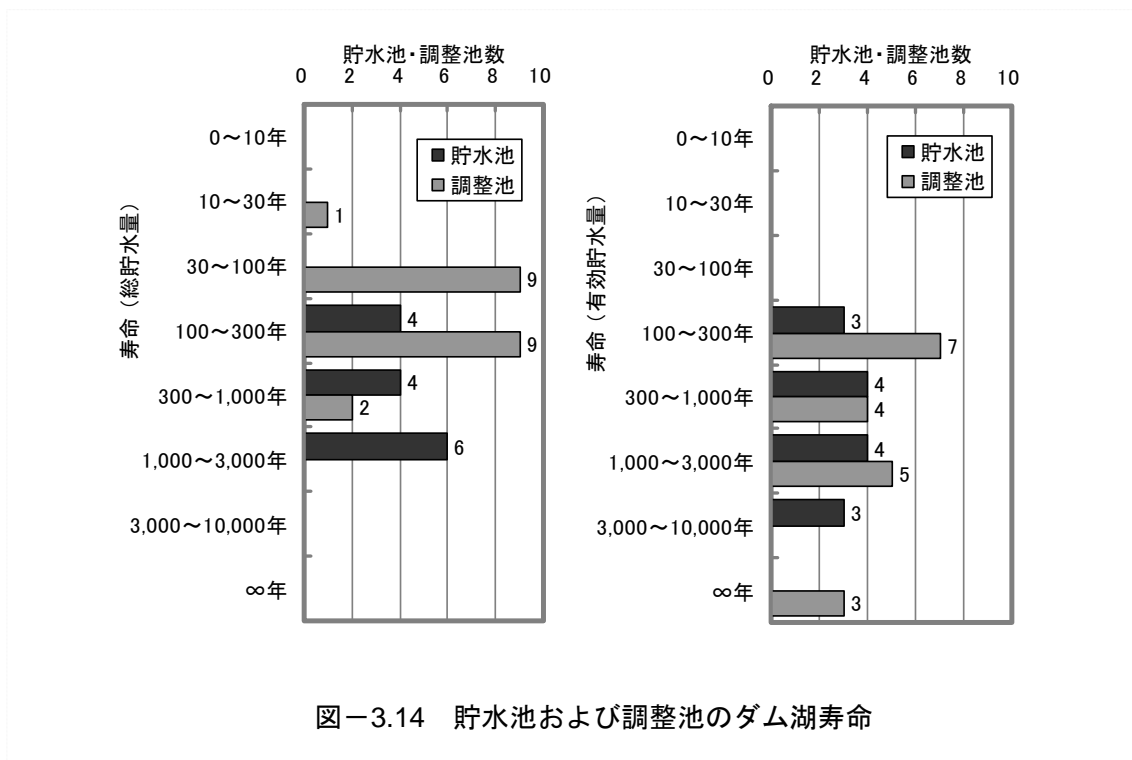


図-3.13 総貯水容量および有効貯水容量についての貯水池と調整池との関係

3.4.2 貯水池および調整池の堆砂状況

貯水池および調整池におけるダム湖の寿命⁶⁾（以下、「寿命」という）を図－3.14に示す。ダム湖の寿命とは、ダム設置から現在までの累計堆砂量、経過年数、およびダム湖の貯水池回転率から得られる土砂捕捉率⁷⁾を基に年間平均流入土砂量を求め、設置当初の総貯水容量をそれにより除することにより得られるものである。有効貯水容量の寿命についても同じ方法で得ている。ダム湖寿命が「∞」と示されている地点が3つあるが、これらの地点は当初よりも貯水容量が増えていることを示しており、現行の運用を継続した場合には永久的にダム湖が堆砂により満杯にならないことを示している。

図－3.14から総貯水容量の寿命は、全体的に貯水池の方が長いことが分かる。調整池は、寿命が100年を下回るものが10地点も存在し全体の半数近くを占めている。一方、有効貯水容量の寿命は、貯水池では総貯水容量の寿命とほぼ同程度であるものの、調整池では全体的に総貯水容量よりも寿命が長く評価されている。その理由は、次節に示すように、ダム堆砂が発生する位置と有効貯水容量の位置との関係が影響しているものと考えられる。



図－3.14 貯水池および調整池のダム湖寿命

3.4.3 貯水池および調整池における堆砂の位置

堆砂がダム湖において、深さ方向のどの位置に生じているかを見るため、ダム湖を一定深さ間隔で区分し、それぞれの範囲に存在する堆砂の割合を算出した。算出結果を図－3.15に示す。算出対象は、1つの河川に連続して設置されている、S川水系（T川）に設置され

ている K 貯水池（上流側）と F 調整池（下流側）、および N 川に設置されている Y 貯水池（上流側）と H 調整池（下流側）である。

図から、調整池の方が貯水池よりもダム湖満水面に近い、水深の浅い範囲に堆砂が大きな割合で生じていることが分かる。満水面近くの堆砂は、出水時にダム湖上流末端部付近の水位上昇に繋がりやすい。また、図中にそれぞれのダム湖の利用水深を示したが、貯水池では利用水深の下方半分から下端付近、調整池では利用水深下端から数 m 程度下方を中心に堆砂存在割合が大きくなっていることが分かる。なお、F 調整池の満水面からの距離 15m から 20m の間に生じている堆砂は、調整池中流域に流入する支川からの多量の土砂供給の影響によるものであるため、利用水深より下方に堆砂が多くなっている。

調整池は、利用水深がダム湖満水面から数 m の範囲であることから、常に高い水位で運用されている。また、ダム湖寿命が示すとおり総貯水容量に対する相対的な流入土砂量が多い。これらのため、出水時においては比較的高いダム水位で多くの土砂が流入することになる。

一方、貯水池の利用水深は数十 m と大きいため、出水時に土砂を受け入れる際のダム水位は一定とならない。また、高いダム水位で土砂が流入し、満水面近くに堆砂が生じて、次の出水を低いダム水位で迎えれば、それらの堆砂は掃砂されてダム湖内を再移動することとなる。さらに、貯水池はダム湖寿命が示すとおり、総貯水容量に対する相対的な流入土砂量が調整池に比較して小さい。

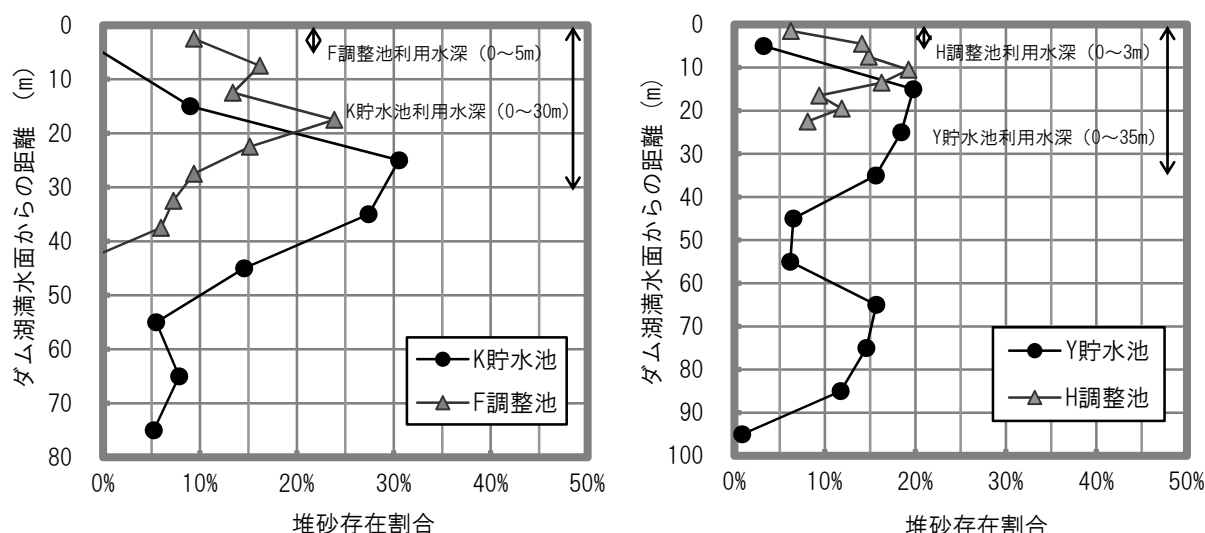


図-3.15 貯水池および調整池における堆砂の位置

その他、調整池は貯水池と比較してダム湖内の河床勾配が小さいことや、流入する土砂の粒度分布範囲が狭いこと等も影響していると考えられるが、いずれにしても、貯水池と

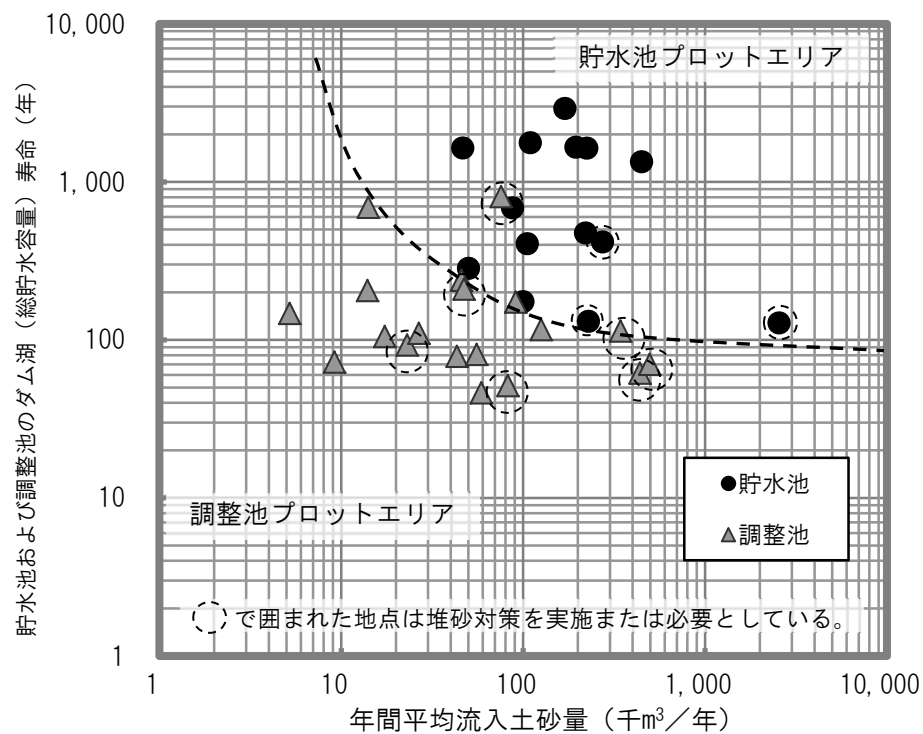
調整池のダム水位運用の違いが堆砂発生位置の違いに大きく関係していると考えられる。また、調整池の有効貯水容量は、満水面から下方数 m 程度までの利用水深内の範囲であることから、有効貯水容量内には堆砂があまり生じていないことが分かる。

3.4.4 貯水池および調整池における流入土砂量

図-3.16 は貯水池および調整池の年間平均土砂流入量と総貯水容量で評価したダム湖寿命との関係を示したものである。図から貯水池と調整池のプロットは、分布範囲が異なっており、その境界を点線で示す。貯水池は年間平均土砂流入量が多いものの、ダム湖寿命も比較的大きい範囲に分布している。

堆砂対策を実施または必要している地点を破線の○で囲んで示しているが、それらの多くは調整池であることが分かる。ただし、ダム湖周辺利用に対応して実施している 2 地点については破線の○で囲んでいない。

堆砂対策の必要性については、横軸が示すダム湖への毎年の平均流入土砂量の大きさにはあまり関係がないことが分かる。一方、縦軸が示す総貯水容量寿命でみると、100 年～200 年を下回る範囲に多くの堆砂対策必要地点が分布しており、ダム湖寿命が堆砂対策の必要性を示す 1 つの指標となることを示している。



図－3.16 貯水池および調整池の流入土砂量とダム湖寿命との関係

3.5 調整池の堆砂問題

発電用ダム湖においては、水利権取得・更新時に付与される水利使用規則に従い、毎年堆砂状況調査を実施し河川管理者に報告する。堆砂状況調査の対象となるダムは、ダム高15m以上のダムで総貯水容量が100万 m^3 以上のものである。調査内容は、ダム湖、ダム湖末端部、および貯水の影響がある考えられる範囲の河床形状の測量を行い、貯水容量、堆砂量、予備放流容量等を算出し、さらに設計流量流下時の水位を不等流計算により求めてダム湖周辺への影響についてとりまとめるものである。ダム湖周辺への影響とは、堆砂進行による水位の上昇が、道路や橋梁などへ及ぼす浸水等の影響のことをいう。報告にあたっては、「ダムの堆砂状況の報告について」⁸⁾に基づいて行う。

電源開発株式会社が、所有・管理するダム湖について行った堆砂状況調査報告結果（平成20年）から堆砂率やダム湖周辺への影響に関する事項について、貯水池と調整池を分け、各々の平均等を求めたものを表－3.5に示す。表中の洪水位とは、設計流量が流下した場合のダム湖周辺の水位のことをいう。堆砂がダム湖周辺へ及ぼす影響については、貯水池と調整池との間に大きな差異があり、洪水位が用地境界を超えている面積、洪水位が影響する恐れのある道路、橋梁のダム湖あたりの数量については、調整池の方が貯水池と比較し

て大幅に上回っている。これは、図－3.2 に示すとおり、調整池は河川の中流域に位置し、貯水池と比較して、田畑、道路、橋梁等の社会資本がダム湖周辺に存在する割合が大きいことが主な要因の 1 つである。また、3.4.2 で述べたとおり、調整池では堆砂が満水面に近い範囲多く存在しており、洪水位上昇を生じさせ易い堆砂形状となっていることも要因と考えられる。

表－3.5 貯水池・調整池別堆砂状況調査結果（平成 20 年）

項 目	貯水池（ダム湖数 14）	調整池（ダム湖数 19）
当初総貯水容量（平均※1）	195,500 千 m ³	13,100 千 m ³
当初有効貯水容量（平均）	149,800 千 m ³	3,700 千 m ³
全堆砂率（平均）	11.0%	16.5%
有効貯水容量内堆砂率（平均）	6.5%	4.31%
洪水位※2 が用地境界を超えている割合※3	57.1%	68.4%
洪水位が用地境界を超えている面積	4,100m ² ／貯水池	24,400 m ² ／調整池
洪水位が影響する恐れのある道路	0m／貯水池	446m／調整池
洪水位が影響する恐れのある橋梁	0.1 橋／貯水池	1.6 橋／調整池

※1 対象ダム湖（14 湖または 19 湖）の平均

※2 設計洪水量が流下した場合のダム湖周辺の水位

※3 対象ダム数に対する、条件と整合するダムの割合

よって、発電用ダム調整池における主たる堆砂問題とは、ダム湖周辺の社会資本設備の浸水被害リスクを高めていることである。この堆砂問題は既に顕在化しており、洪水被害リスク低減を目的とした堆砂対策は、電源開発株式会社が保有管理する 21 の調整池のうち 10 の調整池（48%）で実施されている。

3.6 貯水池の堆砂問題

貯水池における堆砂進行の影響については、調整池のそれとは異なる。貯水池はダム湖周辺に社会資本が少なく、また、3.4.2 で述べたとおり堆砂位置がダム湖の満水位付近に多く生じないため、出水時の浸水被害リスクは比較的小さい。しかしながら、季節的な降雨による流入水を貯水する目的を有する貯水池においては、堆砂進行は貯水容量を減少させその貯水機能に影響をおよぼす。

貯水池は季節的な流量の過不足を調節する役割を担っており、そのために大きな有効貯水容量が必要である。貯水池条件の 1 つとして「年間総流入水量の 20%以上の有効貯水容量を有すること」がある⁹⁾。この条件は有効貯水容量における年間の貯水池回転率（以下「有

効貯水回転率」) が 5 以下であることを意味する。本章では、電源開発株式会社が所有・管理する貯水池式発電所の発電運用の経年変化を水使用率、有効貯水回転率等の指標を基に分析を行う。

電源開発株式会社が所有・管理する貯水池のうち、ダム上流域にダム流入水に影響する設備が比較的少ない 7 つの貯水池について、堆砂進行による有効貯水回転率の発電運用開始当初と 2011 年との比較を表-3.6 に示す。表ではダムが設置されている地域を(括弧内)に示しているが、これは地域別比流量を求める際の区分⁴⁾に従っている。有効貯水回転率を算出するために用いた年間総流入量は 1988 年から 2011 年までの 24 年間の平均である。当初から有効貯水回転率が貯水池条件の 5 以下を満足していない地点があるが、最低限 20

表-3.6 有効貯水回転率の発電運用開始当初と 2011 年との比較

発電所・貯水池 ダム名(地 域)	当初 有効貯水容量	発電運用開始	有効貯水回転率	
			当初	2011 年
O ダム(北 陸)	458,000 千 m ³	1960 年	3.14	3.19
M ダム(北 陸)	330,000 千 m ³	1961 年	4.14	4.21
W ダム(紀伊南部)	68,000 千 m ³	1962 年	4.42	4.47
Y ダム(四国南部)	72,500 千 m ³	1970 年	5.33	5.65
R ダム(北 陸)	50,000 千 m ³	1964 年	7.56	7.66
K ダム(紀伊南部)	89,000 千 m ³	1960 年	12.55	13.63
S ダム(中 部)	205,444 千 m ³	1956 年	24.98	31.97

以下であれば良いとする指針もある。表から全ての貯水池で堆砂進行により有効貯水容量が減少し、有効貯水回転率が大きくなっていることが分かる。

有効貯水回転率の上昇が貯水機能や発電運用にどのような影響を及ぼしているかを確認するために、式(3.1)に示す「水使用率」を 7 つの貯水池について算出した。一般に、有効貯水容量が減少すれば、洪水時の流入水を十分貯水できず、発電機を通らないダム放流量(無効放流量)が増大すると考えられる。

$$\text{水使用率 (\%)} = \frac{\text{年間発電使用水量}}{\text{年間発電使用水量} + \text{年間ダム放流量}} \quad (3.1)$$

信頼性の高いデータが存在する 1988 年から 2011 年の間について、水使用率を算出した結果を表-3.7 に示す。表から、1988 年から 2011 年の間に 7 地点のうち 6 地点で堆砂が進行し、5 地点で水使用率が低下していることが分かる。M ダム地点は堆砂が進行しているものの、ダム放流の頻度がもともと小さく、特に 2000 年以降でダム放流が行われた年は 2

回のみであったため、水使用率がわずかに上昇した。同様に、W ダム地点では、2005 年から 2010 年の間に平年程度の出水・流入が生じず、ダム放流量が減少したため、水使用率が上昇する結果となった。一方、S ダム地点では、堆砂対策の実施により有効貯水容量内の堆砂率が減少している。以上の結果から、貯水池式発電所については、一般的に緩やかながら堆砂が進行しており、出水発生 の程度による流入条件の差異の影響はあるものの、概ね水使用率が低下していることが確認できる。

表－3.7 貯水池における有効貯水容量内堆砂率および水使用率の変化

貯水池 ダム名	有効貯水容量内堆砂率		水使用率	
	1988～2011 年 平 均	1988～2011 年 変化率※	1988～2011 年 平 均	1988～2011 年 変化率※
O ダム	1.68%	0.058%/年	99.67%	－0.059%/年
M ダム	1.59%	0.045%/年	99.11%	＋0.035%/年
W ダム	1.10%	0.066%/年	78.73%	＋0.485%/年
Y ダム	5.61%	0.105%/年	91.22%	－0.158%/年
R ダム	1.36%	0.133%/年	97.89%	－0.183%/年
K ダム	7.94%	0.058%/年	78.84%	－0.104%/年
S ダム	21.86%	－0.027%/年	89.82%	－0.125%/年

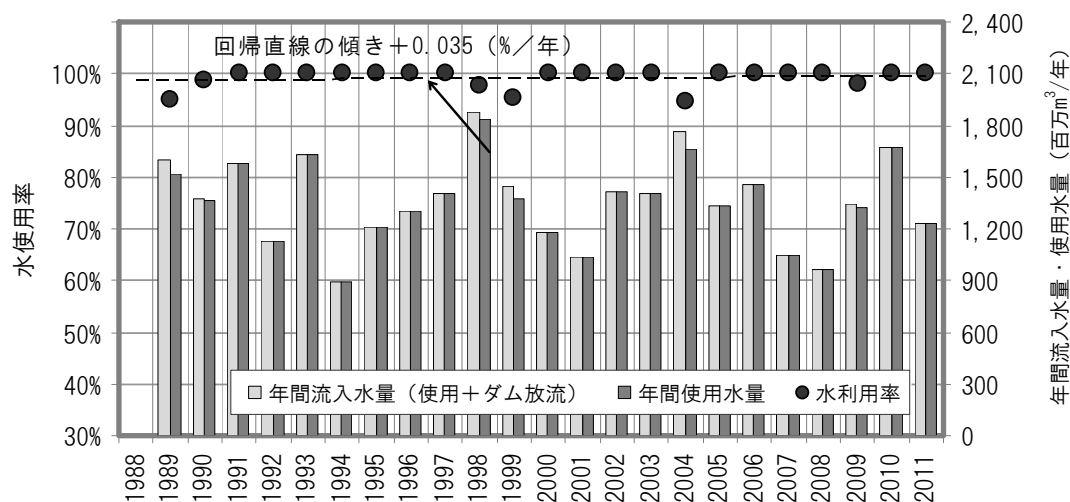
※変化率は回帰直線の傾きである

図－3.17 から図－3.23 に 7 つの地点の水使用率の経年変化、および年間流入水量（使用水量＋ダム放流量）と年間使用水量を示す。図中には、水使用率の回帰直線を載せているが、7 地点のうち 5 地点で低下傾向を示している。水使用率が経年とともに上昇傾向を示した M ダム地点については、ダム放流が殆どなく、どの年に大きな出水があってダム放流を行ったかによって、水使用率の回帰直線の傾きが決まる。同じく、水使用率が上昇傾向を示した W ダムでは、最近数年間の出水が少なく、2006 年、2007 年、2009 年、2010 年にダム放流が行われず、水使用率が 100%となったことが、その要因と考えられる。

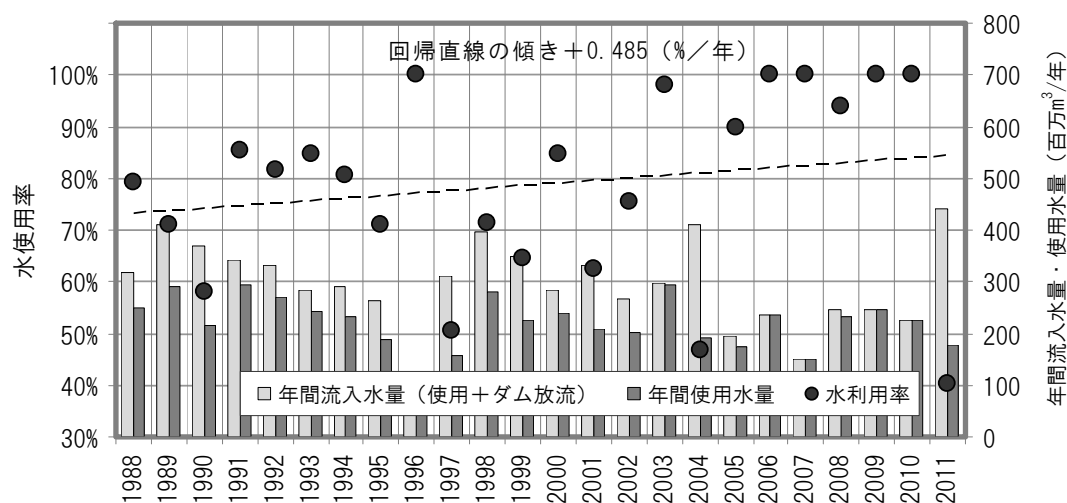
7 つの地点は、水使用率の毎年の変化傾向から大きく 2 つに分けることができる。W ダム、Y ダム、K ダム、S ダムの太平洋側にある水使用率が年毎に大きく異なるものと、O ダム、M ダム、R ダムの日本海側の降雪地域に存在するものの 2 つである。これらは、中小水力発電ハンドブック¹⁰⁾に示される流況曲線の地域別傾向とも整合する。同ハンドブックには、「太平洋側は、年間を通じて降雨量が少なく、出水は梅雨前線停滞、台風の影響などで比較的大きいものはあっても短時間で、その他の期間は比較的少量でフラットである。日本海側は年間の降雨量が多く、特に冬期の積雪が多く、それが天然の貯水池調整効果を

表して、長期間に渡る融雪出水を梅雨時期に引継ぎ、また、晩秋の秋霖（長雨）がある。」と記載されている。この流況の特徴は、貯水池の貯水機能を検討する上で、重要な要因となる。

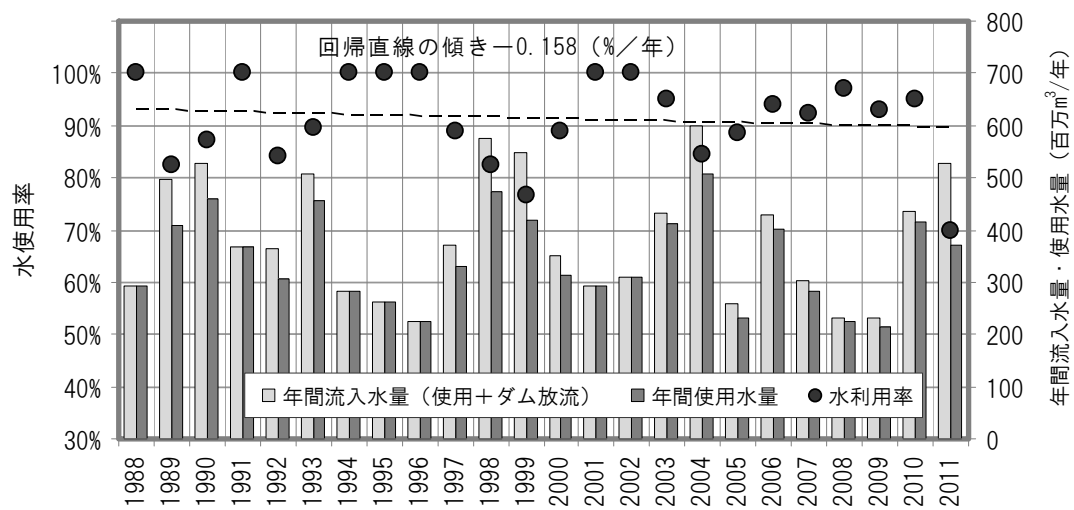
表－3.7 に示すとおり、S ダム貯水池を除く 6 つの貯水池では、この 24 年間に有効容量内の堆砂率が上昇している。この堆砂率の上昇が貯水機能に影響し、水使用率に影響していると推察する。



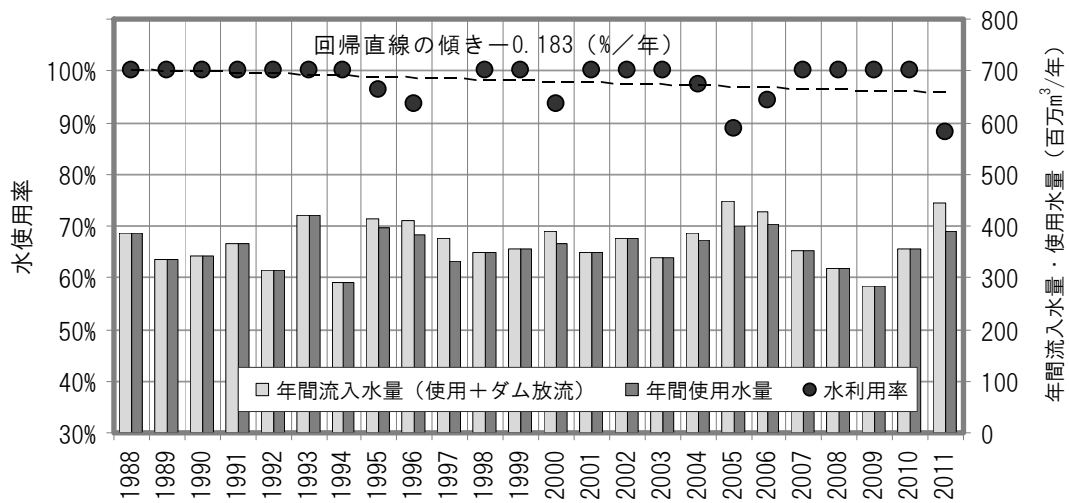
図－3.18 M 発電所（M ダム貯水池） 水使用率の経年変化（1988 年～2011 年）



図－3.19 尾鷲第一発電所（W ダム貯水池） 水使用率の経年変化（1988 年～2011 年）



図－3.20 Y 発電所（Y ダム貯水池） 水使用率の経年変化（1988 年～2011 年）



図－3.21 R 発電所（R ダム貯水池） 水使用率の経年変化（1988 年～2011 年）

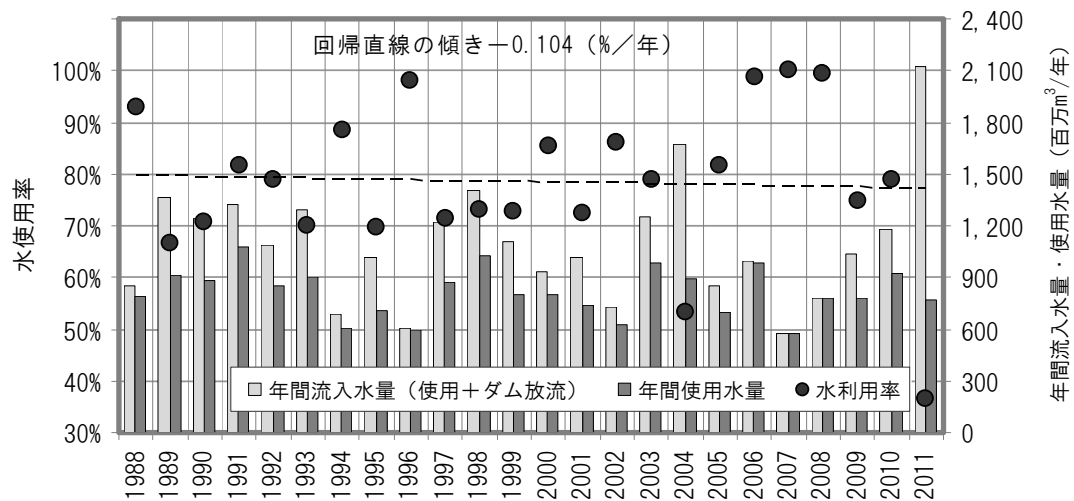


図-3.22 K 発電所 (K ダム貯水池) 水使用率の経年変化 (1988 年～2011 年)

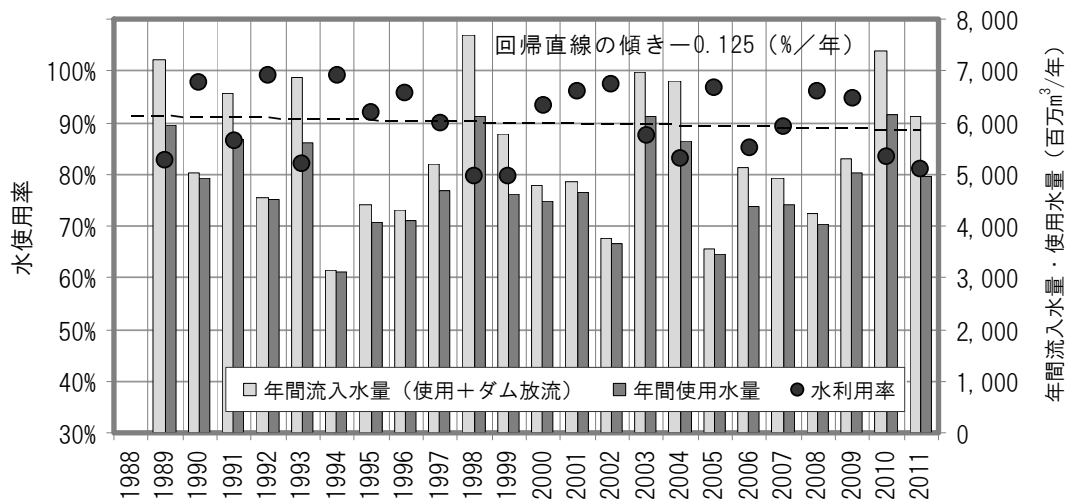
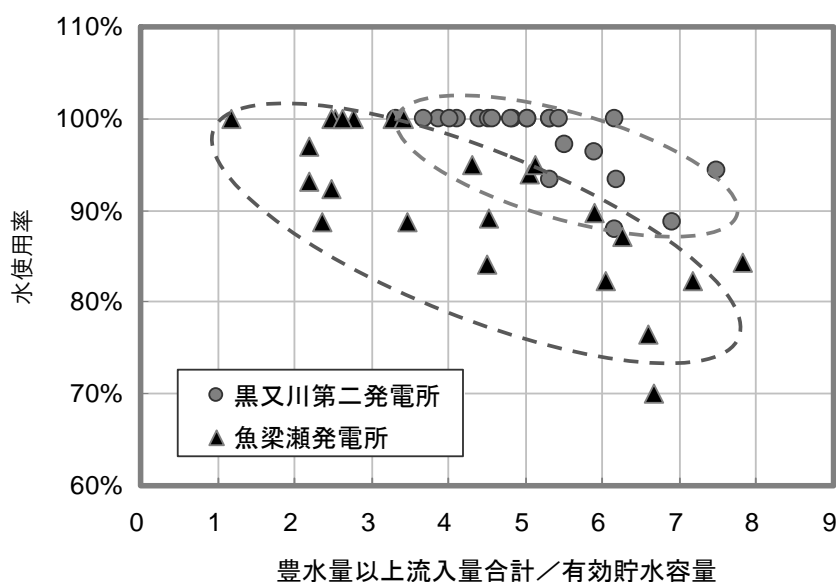


図-3.23 S 発電所 (S ダム貯水池) 水使用率の経年変化 (1988 年～2011 年)

水使用率の低下は、ダム放流をもたらす出水時の大きな流入とこれを調節する有効貯水容量の相対関係にあると考えられる。そこで、有効貯水容量と有効貯水回転率が類似している太平洋側の Y ダム地点と日本海側の R ダム地点とについて、1988 年から 2011 年の間の各年毎における「豊水量以上流入量合計／有効貯水容量」の値と水使用率との関係を図－3.24 に示す。図から、「豊水量以上流入量合計／有効貯水容量」の値が大きい年に水使用率が小さくなることが分かる。このことより、適切な堆砂対策により有効貯水容量の減少を抑制する、さらに積極的に有効貯水容量の回復まで行うことができれば、出水時のダム放流量を小さくし、水使用率の低下を防ぐことができると考えられる。



図－3.24 有効貯水回転率と水使用率との関係

Y ダム地点の 2005 年の出水時（最大流入量 985m³/sec）の発電運用およびダム運用の実績を図－3.25 に示す。また、同図には有効容量内の堆砂率が当時の 6.4%から進行し、20%および 50%となった場合の運用シミュレーション結果も示す。図から明らかなように、水使用率の低下は主としてダム放流によって生じる。なお、運用シミュレーションは、ダム水位が実績と同程度になるようにダム放流を行っている。表－3.8 に結果を示すが、堆砂が進行するとダム放流の開始日時が早くなり、さらに最大放流量が大きくなることが分かる。特に堆砂率が大きい場合、出水初期のダム水位上昇の速さが大きくなり、実績のダム水位と整合させるために、堆砂率 20%および 50%のケースではダム放流量が多くする必要があった。このため、上記の 2 ケースにおいては、ダム放流量の合計が多くなる結果となった。

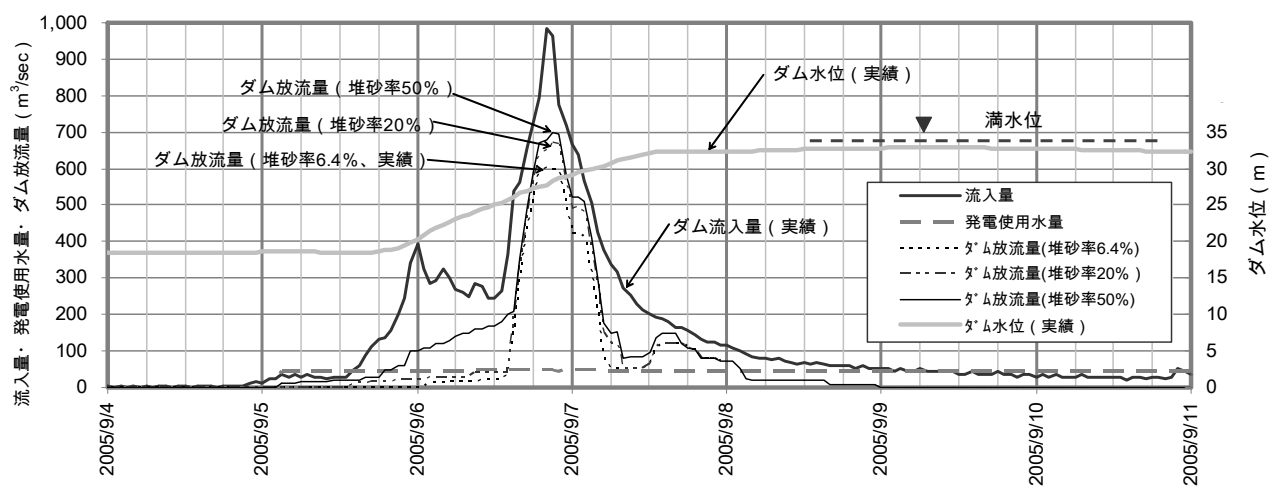


図-3.25 Yダム地点堆砂率別ダム運用比較（2005年9月出水）

表-3.8 Yダム地点の出水時ダム運用実績とシミュレーション結果との比較

有効貯水容量 内堆砂率	最大 放流量	放流開始 日 時	ダム放流量 合 計
6.4%（2005年実績）	601m³/sec	9月6日 2時	29,458 千 m³
20%	670m³/sec	9月5日 14時	34,575 千 m³
50%	700m³/sec	9月5日 3時	45,800 千 m³

年間平均流入量（使用水量+ダム放流量）：384,572 千 m³

3.7 水力発電用ダム湖における堆砂対策

3.7.1 水力発電用ダム湖における堆砂問題の特徴

水力発電設備計画時点では、ダム湖内に計画堆砂容量を設ける対策を行ったものの、計画を超える速度での堆砂進行、計画と異なる形状、位置、様態で堆砂が生じ、現状、掘削排除等の堆砂対策を実施している、または必要となっている地点が多くある。

日本大ダム会議が行った、日本国内のダム地点に対するアンケート調査結果¹¹⁾によると、回答のあった 148 地点のうち 53%にあたる 79 地点で堆砂対策を実施した経験があるとのことであった。また、同調査結果では、電力ダムでの堆砂対策実施の割合が高く、対策の目的が背水・排砂対策としている場合が多いという特徴がある。電力ダムは、堆砂率が高く、比較する年は異なるが平成 21 年の日本国内のダムの平均全堆砂率が 7.4%である¹²⁾のに対し、電力ダムは平成 15 年で 9.2%である¹³⁾。さらに、電力ダムは常時維持される水位が、他ダムと比較して高いことから、背水位上昇となる位置に堆砂が生じやすい傾向がある¹⁴⁾。これらの点が電力ダムの堆砂問題の特徴といえる。

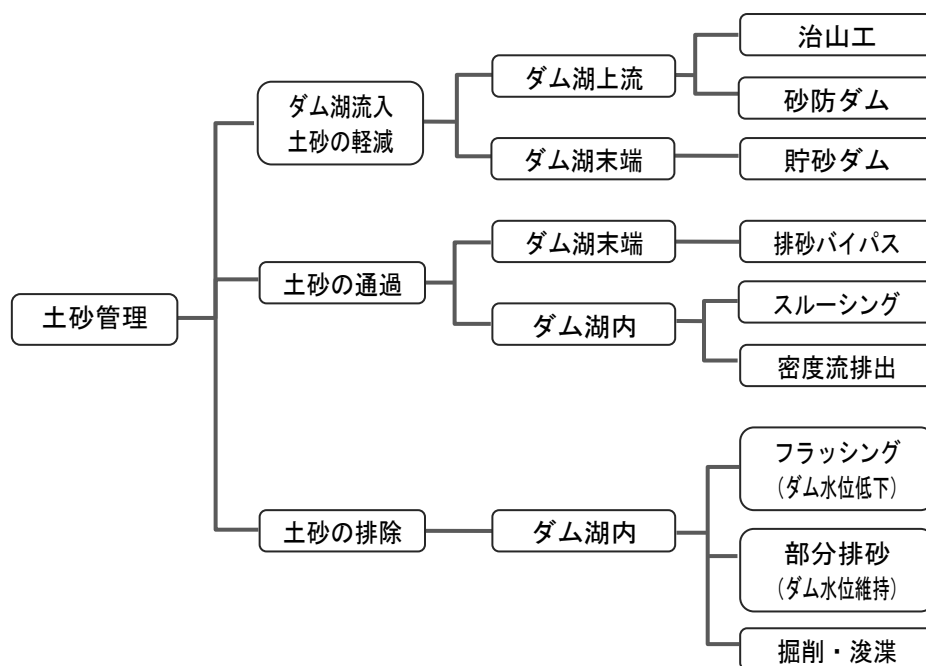
3.7.2 水力発電用ダム湖における堆砂対策

水力発電用ダム湖における堆砂対策について、平成 17 年度に電力土木技術協会が調査を行っている¹⁴⁾。調査結果によると、堆砂の影響が生じている 135 地点において行われた対策は 207 ケースあり、そのうち用地買収、移転、補償、盛土等が 83 ケース件、残りの 124 ケースのうち浚渫、掘削、土石採取、湖内移動、貯砂ダム、土砂供給等の機械掘削による対策が 116 ケースと大半である。黒部川の出し平ダムでのフラッシング排砂¹⁵⁾や S 川水系旭川の排砂バイパス運用¹⁶⁾を除くと、電力ダムにおける用地的対応以外の堆砂対策は殆どが機械掘削による排除である。

3.4.3 で述べたとおり、堆砂問題がダム湖末端部で生じている場合が多いことから、比較的施工機械のアクセスが良いことが、掘削排除が堆砂対策として採用される理由の 1 つといえる。しかし、年間数万 m³以上の流入・堆積土砂を排除するには、多大な費用を要すること、周辺地域へ持続的な負担をかけること、排除した土砂の行き先確保が困難であること、大きな出水が生じれば対策の効果が瞬時に低下すること、等の問題がある。これらは主として調整池における堆砂問題である。

一方、貯水池においては、貯水池末端部ではなく、掘削排除が困難な貯水池の少し深い位置に堆砂が生じる。このため、堆砂進行が調整池ほどに浸水被害リスク上昇の要因とならない。さらに、堆砂進行が発電運用へ及ぼす影響が緩やかである。これらの理由から堆砂問題が表面化せず、徐々に進行している状況であり、堆砂対策が実施されていない場合が多い。

国内で行われている堆砂対策の事例を基にして、ダム湖の土砂管理方法を場所（ダム湖内、またはダム湖末端）や方法により分類したものが図－3.26 である¹⁶⁾。この図から、ダム湖へ流入してくる土砂に対しどのように対処するのか、排除すべき堆砂はダム湖内のどの位置に存在するのか、などから適用実績のある堆砂対策が示される。



図－3.26 ダム湖土砂管理方法分類¹⁶⁾

角は、ダム湖回転率、ダム湖寿命といったダム湖の特徴から、適性のある堆砂対策を導く方法を提案¹⁸⁾しており、図-3.27に示す。その方法とは、ダム湖回転率とダム湖寿命の関係からダム湖の特性に応じて適用可能な堆砂対策を導くものである。図に発電用ダム湖を貯水池と調整池に区別してプロットしているが、それぞれプロットされる領域が異なっており、貯水池には、貯砂ダム設置や土砂還元（掘削排除）が、調整池には、フラッシング排砂やスルーシング排砂が堆砂対策として適用性があることが分かる。これらの既往の研究成果から示される堆砂対策を、発電用ダム湖の水文水理条件および流域環境条件等に応じてどのように選定していけば良いかが課題である。

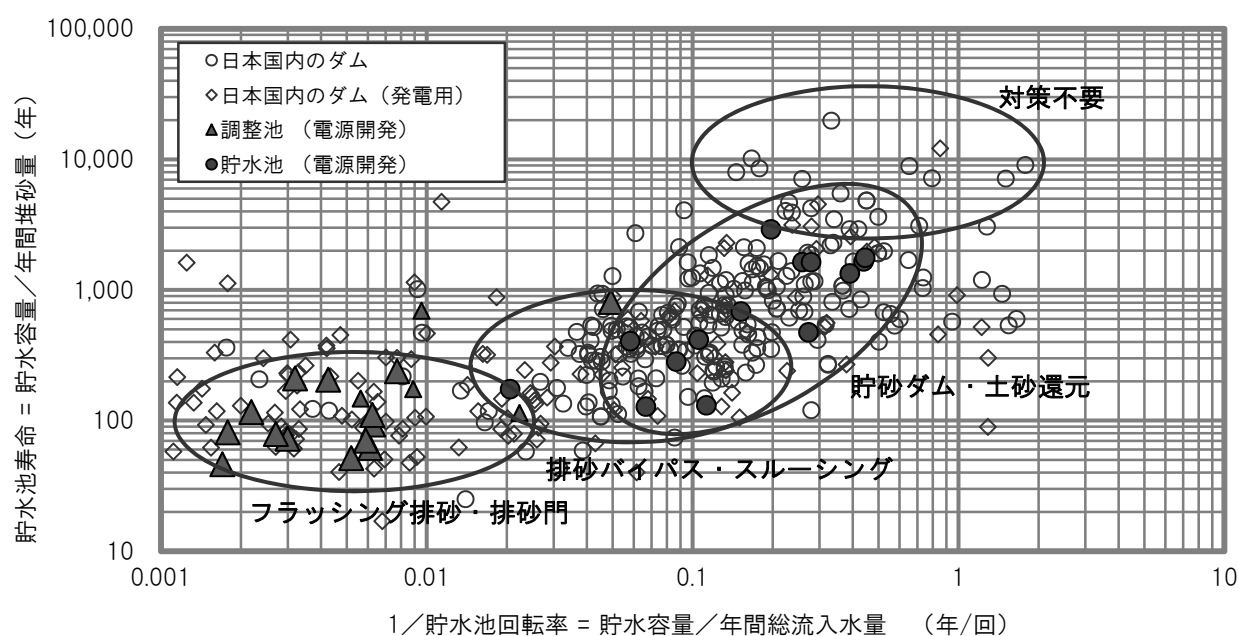


図-3.27 ダム湖回転率とダム湖寿命による堆砂対策区分¹⁸⁾

3.8 まとめ

水力発電用ダム湖における堆砂について、貯水池と調整池を分けて特徴の整理および分析を行なった。その結果、得られた内容を下に記す。

- ・ 水力発電用ダム湖（平均堆砂率 9.2%、平成 15 年）は、日本国内の他のダム湖（平均堆砂率 7.4%、平成 21 年）と比較して、堆砂が進行している。計画時の計画堆砂容量を確保する堆砂対策は既に限界に到達している地点が出てきており、主として掘削排除による堆砂対策が実施されている。
- ・ 水力発電用ダム湖には、貯水池と調整池との 2 種類があり、ダム運用や貯水容量のみならず、堆砂の発生する位置、堆砂進行により生じる問題等が異なっている。
- ・ 水力発電用ダム調整池は、ダム湖規模に対して流入土砂量が多い。また、利用水深が小さくダム水位が常に高いことから、満水面付近に堆砂が生じやすい傾向がある。このため、調整池末端付近の河床位が上昇し、浸水被害リスクが高くなるという問題が生じている。
- ・ 水力発電用ダム貯水池では、堆砂が徐々に進行し、それにとまって発電運用に影響が生じつつある。ただし、その影響は小さいため、現状で大きな問題となっておらず、対策は実施されていない。
- ・ 発電用ダム調整池では、主に掘削排除を主とした堆砂対策が実施されているが、扱える数量に限界があること、多大な費用がかかり経済性確保が難しいこと、周辺環境負荷等の面で持続性がある方法とはいえない。
- ・ 貯水池と調整池とは、堆砂の特性、堆砂により生じる問題、ダム湖運用等の面で異なっており、これらの異なっている点をふまえて堆砂対策を計画・実施することが重要である。

参考文献

- 1) エレクトリカルジャパン（国立情報学研究所）：発電所データベース，2012.
- 2) 千秋真一：発電水力演習，学献社，1967.
- 3) 建設省：建設省河川砂防技術基準，1958.
- 4) 建設省河川局：改訂新版・建設省河川砂防技術基準（案）同解説，1997.
- 5) 日本大ダム技術委員会排砂対策分科会：ダム排砂対策の現状と課題，大ダム No.176（2001-7），2001.
- 6) 角哲也：土砂管理で「千年ダム」の実現を，季刊河川レビュー，新公論社，2005.
- 7) Brune, G. M. : Trap efficiency of reservoirs, Trans. AGU, 34-4, pp. 407~418, 1953.
- 8) 国土交通省河川局：ダム堆砂状況の報告について，2001.
- 9) 千秋真一：発電水力演習，学献社，1967.
- 10) （財）新エネルギー財団：中小水力発電ガイドブック，2012
- 11) （社）日本大ダム会議土砂管理分科会：土砂管理分科会報告書一貯水池の土砂動態と土砂制御法一，大ダム No.212, pp12-129, 2010.
- 12) 角哲也ら：貯水池土砂管理ハンドブック，2010.
- 13) 原子力安全・保安院 電力安全課：平成 15 年度発電用貯水池・調整池堆砂状況，電力土木 No.131, 2004.
- 14) （社）電力土木技術協会：水力発電ダム堆砂に関わる調査と啓発 調査報告書，2006.
- 15) 太田耕一ら：出し平ダム・宇奈月ダム連携排砂・通砂における環境調査の概要，電力土木 No.334, pp30~34, 2008.
- 16) 土居裕幸ら：排砂バイパス設備を用いたダム下流河川の環境保全，第 7 回東アジア地域ダム会議中国鄭州大会，2011.
- 17) Tetsuya SUMI and S.A. Kantoush : Sediment Management Strategies for Sustainable Reservoir, pp353- 362 , Proc. ICOLD annual symposium , 2011.
- 18) 角 哲也：排砂効率および環境適合を考慮したダム堆砂対策の選択，土砂管理とダムに関する国際シンポジウム～第 2 回東アジア地域ダム会議～，pp17-28, 2005.

第四章 水力発電用ダム調整池の堆砂対策

第三章では、水力発電用ダム調整池における堆砂の特徴、堆砂問題について述べた。本章では、第三章で得られた調整池における堆砂の特徴を活かした堆砂対策について論じる。

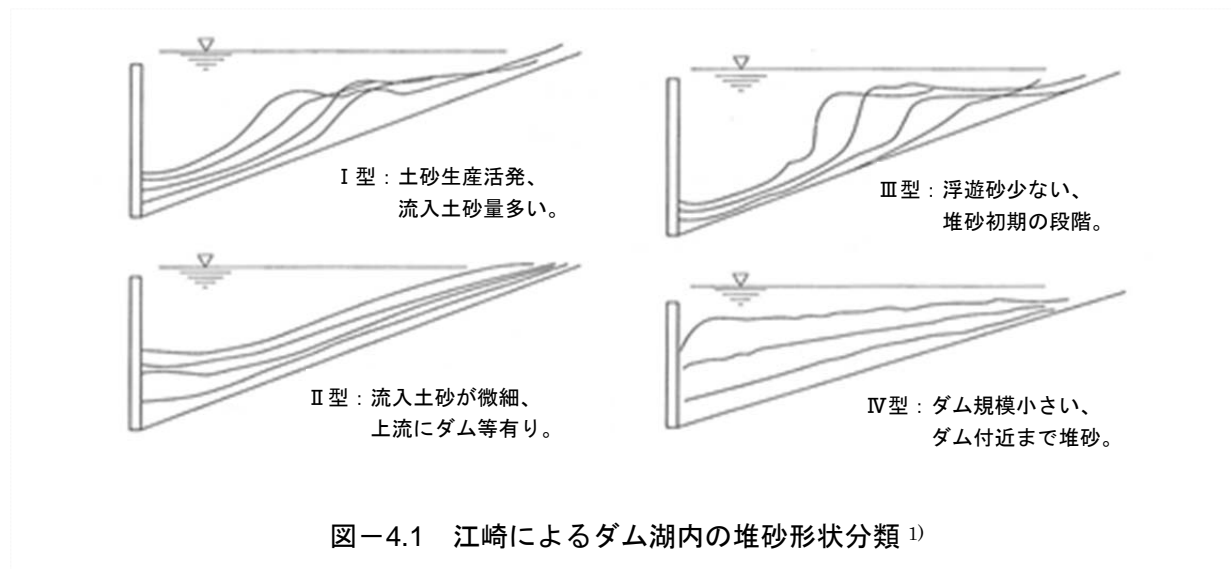
4.1 調整池のタイプ分類（池タイプ、川タイプ、中間タイプ）

4.1.1 ダム湖内の堆砂形状に関する従来の研究

ダム湖内の堆砂形状について、江崎¹⁾は図-4.1に示すような4つの基本型に分類し、関連する要因について次のように考察している。Ⅰ型は掃流砂、浮遊砂とも相当量流入する場合で、流域にかなりの崩壊地が存在し、土砂生産が活発なところでみられる堆砂形状である。Ⅱ型は流入土砂の殆どが微細な浮遊砂の場合に形成される形状であり、直上流に大規模なダム湖がある場合、あるいは上流に緩勾配区間があり、掃流砂の流入が少ない場合に多くみられる。Ⅲ型は浮遊砂の供給源が少ない流域でかつ堆砂の比較的初期の段階において現れる形状であり、Ⅳ型は規模の小さいダム湖でダム堤体付近まで著しく土砂が堆積している場合にみられる形状である。このように、江崎はダム湖上流域の土砂生産状況、地形、ダム設置状況が堆砂形状に大きく影響を及ぼすものと考察した。

Strand と Pemberton²⁾はダム湖内における堆砂の分布を水深方向に整理し、湖沼型、氾濫原型、丘陵型、峡谷型に分類した。この分類結果により、ダム湖内の堆砂形状については、ある程度の予測が可能であるとしている。

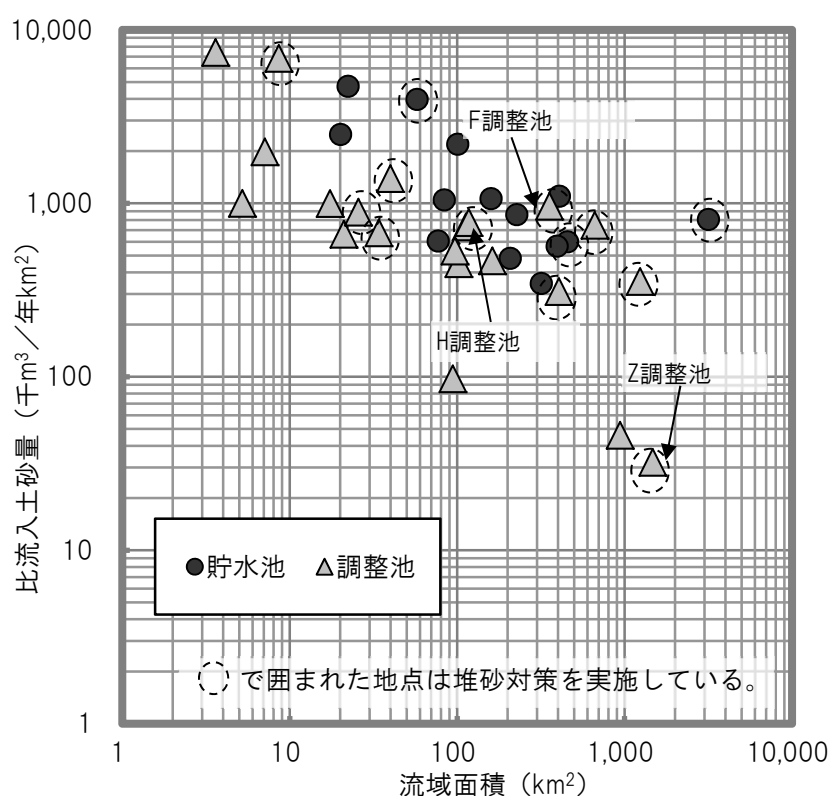
これらの成果は、ダム湖上流域の土砂生産状況やダム湖周辺の地形等から堆砂形状を予測する場合や、既に堆砂が進行している時の要因分析を行う場合に役立つものである。これらの研究を参考に、浸水被害リスク低減を目的とした堆砂対策の優先度が高い発電用調整池の堆砂形状等について以下に分析を行う。



4.1.2 調整池上流域土砂生産状況と堆砂対策必要性との関連性

調整池上流域における土砂生産状況と、調整池における堆砂対策の必要性との間に関連性があるかについて分析するため、電源開発株式会社が所有・管理するダム湖の流入・堆積土砂量について整理した結果を、図－4.2 に示す。全体的にみると、流域面積が大きくなるほど、比流入土砂量が小さくなる傾向を示しており、芦田ら³⁾の整理結果と整合する。芦田らは、この要因について、地形勾配や崩壊面積率等が影響していると分析しており、上流域と下流域でこれらの値が異なることを指摘している。

調整池における堆砂問題の多くが、上昇した洪水位による影響であることは既に述べた。図－4.2 において、堆砂対策を実施または必要としている調整池を破線の○で囲んで示している（貯水池についても同様、ダム湖周辺利用対応の堆砂対策は除く）が、これらは比較的に比流入土砂量が多く、また流域面積が数十 km² 以上の範囲に多く分布していることが分かる。しかしながら、その分布位置から上流域の土砂生産状況と堆砂対策の必要性との間に明確な関連性を見出すことは難しい。



図－4.2 流入土砂量と流域面積の関係

(流域面積については上流ダムによる影響を考慮して設定している)

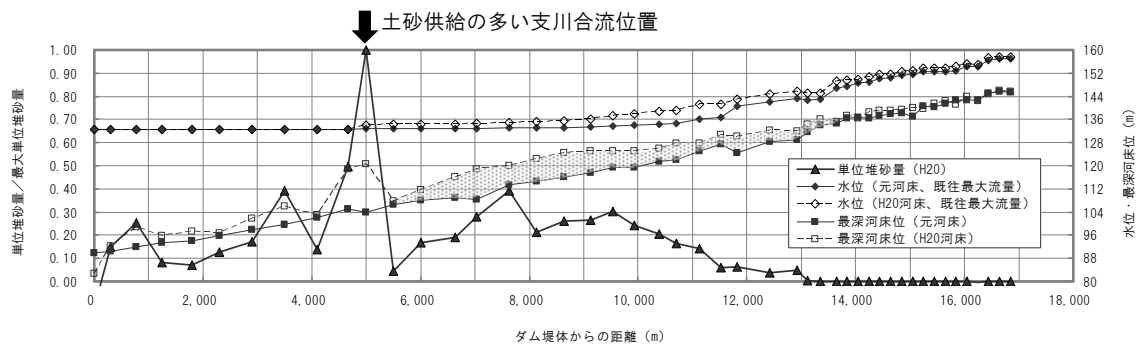
4.1.3 調整池堆砂位置、既往最大洪水位・最深河床位による分析

調整池内における流入土砂の堆積、水面形等との関係等について分析するために、19 の調整池の中で堆砂対策を必要としているもののうち、特徴の異なる代表的な 3 つの調整池（F 調整池、H 調整池、Z 調整池）を対象に、単位堆砂量、既往最大流量時の水位、および最深河床位を貯水池縦断方向に整理した。整理対象とした調整池の諸元を表－4.1 に示す。単位堆砂量とは、ある区間における堆砂量をその区間長で除したものである。既往最大流量水位とは、ダム設置後のダム地点における既往最大流量が流下した場合に、不等流計算により得られるダム湖周辺の水位である。最深河床位とは、各地点の河床横断形状のうち、最も低位の河床位である。整理結果を図－4.3.1、図－4.3.2、図－4.3.3 に示す。

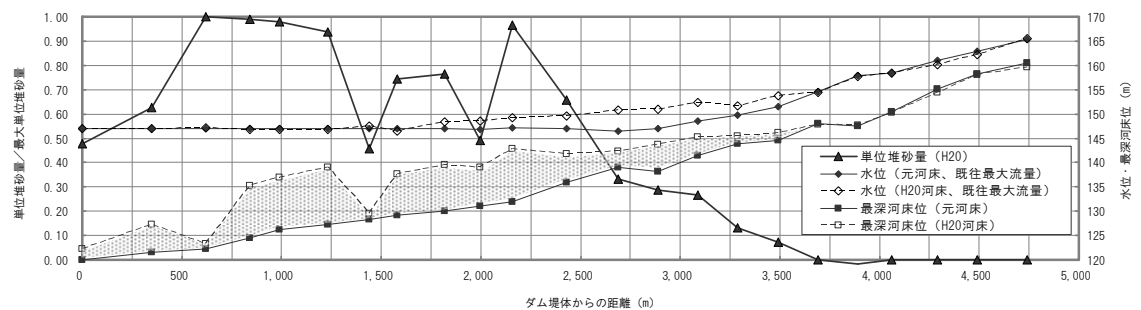
図－4.2 のグラフにおいては、これら 3 つの調整池のそれぞれのプロット位置を示している。

表－4.1 堆砂位置等の整理対象調整池の諸元

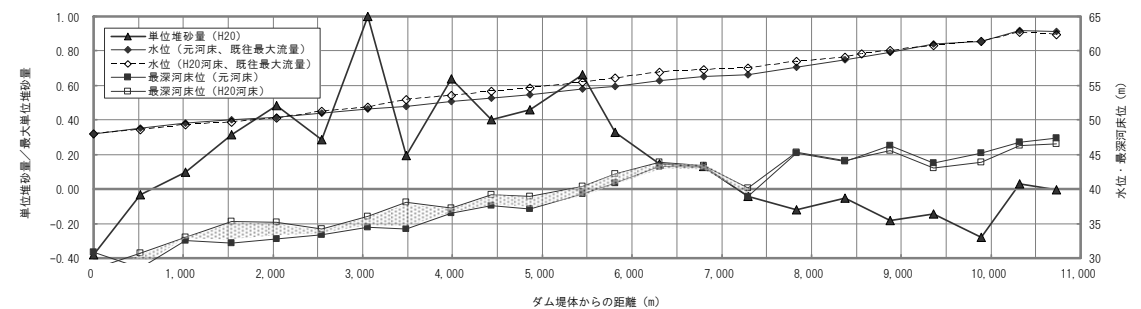
項 目	F調整池	H調整池	Z調整池
総貯水量	43,000千m ³	4,240千m ³	9,930千m ³
流域面積（上流ダム湖分除く）	356km ²	113km ²	1,472km ²
竣工年	1962年	1960年	1958年
堆砂量（平成20年）	11,591m ³	1,717千m ³	732千m ³
全堆砂率（平成20年）	27%	41%	7.4%
有効貯水容量内堆砂率（平成20年）	15%	11%	－2.7%
ダム高×ダム天端延長	76m×211m	38m×124m	27m×139m
利用水深	5m	3m	2m



図－4.3.1 F 調整池の単位堆砂量、既往最大流量流下時の水位、最深河床の縦断分布



図－4.3.2 H 調整池の単位堆砂量、既往最大流量流下時の水位、最深河床の縦断分布



図－4.3.3 Z 調整池の単位堆砂量、既往最大流量流下時の水位、最深河床の縦断分布

4.1.3.1 F 調整池についての分析

F 調整池は、整理分析の対象とした 19 地点の調整池の中で 2 番目に大きい総貯水容量を有するが、流入土砂量が多く、全堆砂率は 27%（有効貯水容量の堆砂率は 15%）となっている。ダム堤体から 5,000m 地点付近に堆砂が多く存在しているが、これは当該地点で土砂供給の多い支川が合流しており、合流点から下流の堆砂は、殆どがこの支流からの土砂供給によるものと推察される。一方、本川上流からの堆砂進行はダム堤体から 6,000m 地点く

らいまでと考えられる。

図には、元河床および平成 20 年河床における既往最大流量時の水位、および堆砂の生じている範囲を網かけで示しているが、堆砂が生じている範囲と、同最大流量時水位の水面勾配変化から推定される河川状態から池状態に遷移する範囲とはおおよそ整合しており、当初はダム堤体から 12,000m くらいの地点であったものが、徐々にダム堤体方向に移動しているものと推察される。堆砂は、ダム堤体から 5,000m の地点と 8,000m の地点に多く生じているが、前述のとおり、5,000m 地点およびそれよりも下流の堆砂は、支川からの流入土砂が殆どと推察されることから、図中で最深河床位の上昇で示される堆砂域については網かけをしていない。本川起源とされる堆砂域について網かけを行っているが、その範囲が調整池全域に生じていないことが分かる。

4.1.3.2 H 調整池についての分析

H 調整池は、19 地点の調整池の中で 10 番目の総貯水容量を有し、全堆砂率は 40.5% である（有効貯水容量の堆砂率は 11%）。上流域から流下方向へ続く既往最大流量水位の水面勾配は調整池の中流域 1,500m から 3,000m の付近でほぼ水平となり、以降は池状態となっているが、網かけで示す通り、堆砂はダム堤体付近でやや少ないものの調整池全域に生じている。河川状態から池状態に遷移し始める地点と堆砂が生じ始める地点とはおおよそ整合しており、F 調整池と同様である。H 調整池は、既往最大流量水位の水面勾配が水平に変化する地点が確認でき、出水時に池状態となる範囲のあることが分かるが、堆砂は調整池全域に生じている。この理由は、貯水池延長が数千 m と短く、調整池全域を通じて河道地形の変化が小さいため、洪水時には上流からダム堤体付近まで同程度の流況となるからである。また、堆砂が調整池全域に生じることにより、さらに流砂されやすくなり、ダム堤体付近まで到達することとなる。

4.1.3.3 Z 調整池についての分析

Z 調整池は、19 地点の調整池の中で 9 番目の総貯水容量を有しており、全堆砂率は 7.4% である（有効貯水容量の堆砂率は -2.7%）。既往最大流量が流下する場合は、ダム堤体から調整池上流域までの水面勾配はほぼ一定である。H 調整池では、堆砂が中流域に多く生じているが、既往最大流量水位の水面勾配変化との関連性を見出すことはできない。Z 調整池は、F 調整池や H 調整池のように川状態から池状態へ遷移することではなく、既往最大流量流下時には全域で河川状態になる。

単位堆砂量のマイナスは、元河床よりも河床が低下していることを示す。有効貯水容量の堆砂率のマイナスは、河床低下により有効貯水容量が増加していることを示す。

4.1.4 分析結果に基づく調整池のタイプ分類

整理対象とした3つの特徴の異なる代表的な調整池について、堆砂が調整池全域に生じているか、既往最大流量水位の水面勾配が調整池全域に存在しているか、の2点で分類した結果を表-4.2に示す。「池タイプ」は、既往最大流量流下時において、調整池に池状態が保たれる範囲が十分にあり、堆砂が徐々に上流側からダム堤体に向かって進行するタイプである。「川タイプ」は、同流量流下時に調整池のほぼ全域が河川状態となり、堆砂が調整池全域に生じるタイプである。その中間的な傾向を示すものを「中間タイプ」とし、既往最大流量時に調整池に池状態が保たれる範囲があるものの、堆砂は調整池全域に生じる。

表-4.2の右端の欄に、検討対象とした調整池を、各タイプ別に分類し、その該当ダム数、平均ダム高、平均設計洪水量、および平均貯水池回転率（年間）を示す。これらの平均値を比較すると、「池タイプ」はダム高が大きく、設計洪水量および貯水池回転率が小さく、「川タイプ」ではダム高が小さく、設計洪水量および貯水池回転率が大きいことが分かる。「中間タイプ」は、ちょうどこれらの値の間である。これらタイプ別の平均的な値は、調整池における効率的な堆砂対策を検討する場合に、重要な要素となることが推察される。調整池の中で半数程度が「中間タイプ」であった。

表-4.2 調整池のタイプ分類

調整池名 (ダム高)	堆砂が調整池 全域に存在	水面※勾配が 調整池 全域に存在	調整池 タイプ	(タイプ別) ダム数・ 平均ダム高・平均設計洪水量 ・平均貯水池回転率
F調整池 (76m)	×	×	池タイプ	5基・58m・2,700m ³ /s・120
H調整池 (38m)	○	×	中間タイプ	10基・40m・4,000m ³ /s・260
Z調整池 (26.5m)	○	○	川タイプ	4基・28m・8,000m ³ /s・320

※ 既往最大流量（ダム設置後）流下時

4.2 川タイプ調整池におけるダム水位低下運用を主とした堆砂対策

水力発電用ダム調整池の川タイプにおける、ダム水位低下運用による堆砂対策について、Z 調整池を対象に河床変動解析による検討を行う。Z 調整池は総貯水量 9,930 千 m³、流域面積 1,629km²（上流ダム湖の流域を除外すると 1,472km²）、供用開始は昭和 33 年 9 月であり、中流域の洪水水位上昇抑制を目的として、現在、掘削による堆砂対策を実施している。

4.2.1 河床変動解析モデルおよび検討ケース

河床変動解析は一次元不等流混合粒径河床変動モデルを用いて行った。モデルは、粒径 100mm 程度の掃流砂から、浮遊砂、粒径 0.1mm 以下のウォッシュロードまでを扱うものであり、掃流砂量式は芦田・道上式⁴⁾、浮遊砂量の平衡基準面濃度式は芦田・道上式⁵⁾により、濃度分布式についてはレーン・カリンスキの式⁶⁾により求めた。

・流れの連続式・運動方程式

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (4.1)$$

$$\frac{1}{gA} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (Z_b + h) + I_e = 0 \quad (4.2)$$

ここに、 Q ：断面流量， q ：横流入量， A ：流水断面積， Z_b ：河床位， h ：水深， I_e ：損失エネルギー勾配， g ：重力加速度

・河床の連続式

$$\frac{\partial Z_b}{\partial t} + \frac{1}{B_b} \left[\sum_{k=1}^{N_b} \left\{ \frac{1}{1-\lambda_b} \frac{\partial (B_s q_{bk})}{\partial x} + \frac{B_s (E_{sk} - D_{sk})}{1-\lambda_s} \right\} + \sum_{k=N_b+1}^{N_d} \left\{ \frac{B_s (E_{wk} - D_{wk})}{1-\lambda_w} \right\} \right] = 0 \quad (4.3)$$

ここに、 Δt ：10～3600 (s)， Z_b ：河床位， B_b ：河床幅， B_s ：流砂幅， q_{bk} ：粒径 d_k の単位幅掃流砂量， E_{sk} ： D_{sk} ：粒径 d_k の浮遊砂の河床付近における単位面積当りの巻き上げフラックスと沈降フラックス， E_{wk} ， D_{wk} ：粒径 d_k の wash-load の河床付近における単位面積当たり巻き上げフラックスと沈降フラックス， λ_b ， λ_s ， λ_w ：それぞれ掃流砂，浮遊砂及び wash-load による堆積物の空隙率， N_d ：粒径階の分割数， $k = 1 \sim N_b$ ：掃流砂、浮遊砂の粒径階の番号， $k = N_b+1 \sim N_d$ ：wash-load の粒径階の番号

・掃流砂量式⁴⁾

$$\frac{q_{bk}}{\sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd_k^3}} = 17 p_{bk} \tau_{*ek}^{3/2} \left(1 - \frac{u_{*ck}}{u_*} \right) \left(1 - \frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}} \right) \quad (4.4)$$

ここに、 σ ， ρ ：それぞれの砂粒子(=2.65)及び水の密度(=1.00)， g ：重力加速度， d_k ：粒径階 k の代表粒径，

p_{bk} : 粒径階 k の河床において占める割合 ($\sum p_{bk}=1$), u_* : 摩擦速度, u_{*ck} : 粒径 d_k の移動限界摩擦速度, τ_{*k} , τ_{*ck} : 粒径 d_k の無次元掃流力と無次元限界掃流力, τ_{*ek} : 粒径 d_k の無次元有効掃流力である。

・ 平衡基準面濃度式⁵⁾・濃度分布式⁶⁾

$$C_{ek} = p_{bk} k_0 \left\{ \frac{g(\xi_0)}{\xi_0} - G(\xi_0) \right\} \quad (4.5)$$

$$\frac{C_k}{C_{ek}} = \exp \left\{ -15 \left(\frac{z - z_a}{h} \right) \left(\frac{w_{sk}}{u_*} \right) \right\} \quad (4.6)$$

ここに、 p_{bk} : 粒径階 k の河床において占める割合 ($\sum p_{bk}=1$), u_* : 摩擦速度 (m/s), C_k : 粒径 d_k の粒子の断面平均濃度, C_{ek} : 粒径 d_k の $z = z_a$ における平衡濃度 (芦田・道上らによる平衡基準面濃度式), h : 水深

(m), w_{sk} : 浮遊砂 d_k の沈降速度 (m/s), k_0 : 比例定数 (=0.0042), $\xi_0 = w_{sk} / (0.75 u_*)$, $g(\xi_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{\xi_0^2}{2} \right)$,

$$G(\xi_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\xi_0}^{\infty} \exp \left(-\frac{1}{2} \xi^2 \right) d\xi$$

流入土砂条件については、貯水池上流部の地形および河床材料粒度、調整池内堆砂量および粒度を基に設定した。モデルの精査は、現在河床に至るまでの28年間の実績データにより行い、河床位変化、河床材料粒度等を概ね整合させた。当該28年間の間には、既往最大流量6,350m³/secの出水実績、累計約20万m³の堆砂排除実績が含まれている。

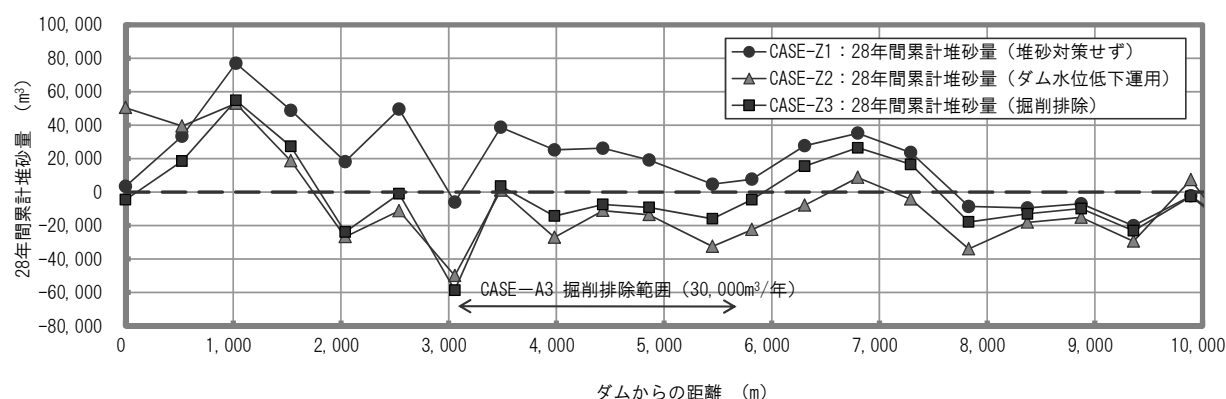
解析は現在河床を初期河床とし、解析モデル精査に使用した実績データを流入量等の与条件として、今後の28年間について行った。検討ケースは表－4.3に示すとおりである。

表－4.3 Z調整池（川タイプ）河床変動解析検討ケース

ケースNo.	内 容
CASE－Z1	今後28年間、堆砂対策を実施せず
CASE－Z2	今後28年間、出水時にダム水位を低下させる運用を行う。 流量が1,000m ³ /secを越えるとゲート開放へ移行しダム水位を低下させる。流量ピーク後200m ³ /secを下回ると水位回復へ移行する。
CASE－Z3	今後28年間、毎年30,000 m ³ の調整池内堆砂掘削排除を行う。掘削排除はダムからの距離3,000mから5,500mの範囲で行う。

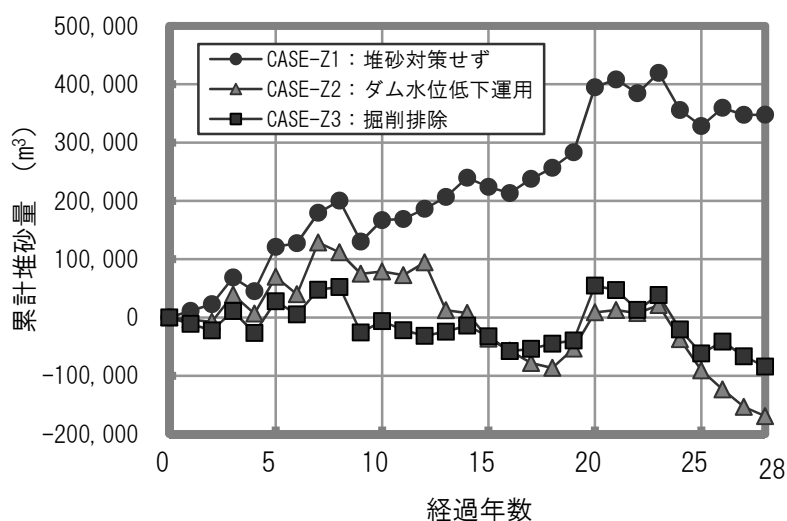
4.2.2 河床変動解析による堆砂対策の物理的有効性評価

図－4.4 は、解析期間 28 年間に堆砂が生じる位置と量を示すものである。CASE－Z1 では調整池の下流域から中流域にかけて堆砂量が増加する。一方、CASE－Z2 と CASE－Z3 では、下流域のダム地点付近では堆砂量が増加するものの、ダムより 2,000m から 6,000m の中流域では堆砂量が減少する。この堆砂量の減少が中流域で洪水位を低下させるのに有効に働き、これら 2 つのケースが堆砂対策として有効であることが示された。これらは、堆砂対策手法は異なる（水位低下運用と掘削排除）ものの、対策により形成される河床位は類似しており、ほぼ等しい効果が得られる対策とみなすことができる。



図－4.4 Z 調整池（川タイプ）河床変動解析結果（位置別 28 年間累計堆砂量）

図－4.5 は、解析期間 28 年間の調整池内累計堆砂量の経年変化を示すものである。CASE－Z1 は、経過 20 年目程度までは年間 20,000m³ 程度の堆砂進行であるが、以降の堆砂量はほぼ平衡状態である。当該平衡状態においては、出水時の洪水位は高い位置に保持される



図－4.5 Z 調整池（川タイプ）河床変動解析結果（累計堆砂量変化）

ため、洪水被害対策の観点から、この状態を許容することはできない。

CASE-Z2 と CASE-Z3 は、堆砂量は増減をするものの、ほぼ平衡状態である。ただし、**図-4.4** で示したとおり、堆砂量は中流域で減少、ダム堤体付近で増加し、堆砂位置は変化している。この変化により、堆砂量は変化せずとも、洪水水位上昇の抑制は達成されることとなる。

以上の河床変動解析により、CASE-Z2 および CASE-Z3 の堆砂対策の継続的な実施が有効と確認された。

4.2.3 ダム水位低下運用等による堆砂対策の経済性評価

表-4.4 は、これらダム水位低下運用および掘削排除に要する費用を概算で整理したものであり、今後 30 年間を対象としているが、社会的割引率は用いていない。費用項目は、既の実施している社内地点および他河川での例等を基に設定した。発電用ダム湖の堆砂対策において、特に発生する発電量減少（減電）についても、費用項目として計上した。これらの堆砂対策の効果はほぼ同等であるが、30 年間の費用はダム水位低下運用による対策の方が、掘削排除費用の約 4 分の 1 程度と経済的である。

表-4.4 Z 調整池（川タイプ）堆砂対策費用（今後 30 年間）

対策方法	項 目	30 年間の費用
ダム水位低下運用 (CASE-Z2)	排砂に伴う減電	300
	洪水吐・護岸補修	210
	補修に伴う減電	126
	調査検討（河川影響他）	430
	合 計	1,066
掘削排除 (CASE-Z3) 掘削数量：30,000m ³ /年	掘削運搬土捨	3,300
	掘削に伴う減電	540
	土捨場整備	510
	調査検討（土捨場他）	80
	合 計	4,430

単位：百万円

ダム水位低下運用によるダム下流への土砂供給については、費用便益分析⁸⁾等により経済的に評価し費用化することも可能であり、その場合はスルーシングの経済性がさらに高くなる。また、掘削排除した堆砂は土捨場まで運搬して処理すると仮定したが、現実的には土捨場を継続的に確保していくことは非常に難しい。

これらの結果から、川タイプの発電用ダム調整池においては、堆砂対策として、出水時にダム水位低下を行い、流入土砂および堆積土砂をスルーシングさせる方法が物理的に可能であり、経済的に有利であることが示された。

4.3 中間タイプ調整池におけるダム水位低下運用を主とした堆砂対策

川タイプに続いて、水力発電用ダム調整池の中間タイプにおける、ダム水位低下運用による堆砂対策について、H 調整池を対象に河床変動解析による検討を行った。H 調整池は総貯水量 4,240 千 m³、流域面積 217km²（上流ダム湖の流域を除外すると 113km²）、供用開始は昭和 35 年 7 月であり、中流域の洪水水位上昇抑制を目的として、現在、堆砂対策の準備検討を行っている。

4.3.1 河床変動解析モデルおよび検討ケース

河床変動解析は川タイプと同様に一次元不等流混合粒径河床変動モデルを用いて行った。モデルの精査についても同様に、現在河床に至るまでの 22 年間の実績データにより行った。当該 22 年間の間には、既往最大流量 2,248m³/sec の出水実績、累計約 10 万 m³の砂利採取による堆砂排除の実績が含まれている。解析は現在河床を初期河床とし、解析モデル精査に使用した実績データを流入量等の与条件として、今後の 22 年間について行った。検討ケースは表－4.5 に示すとおりである。

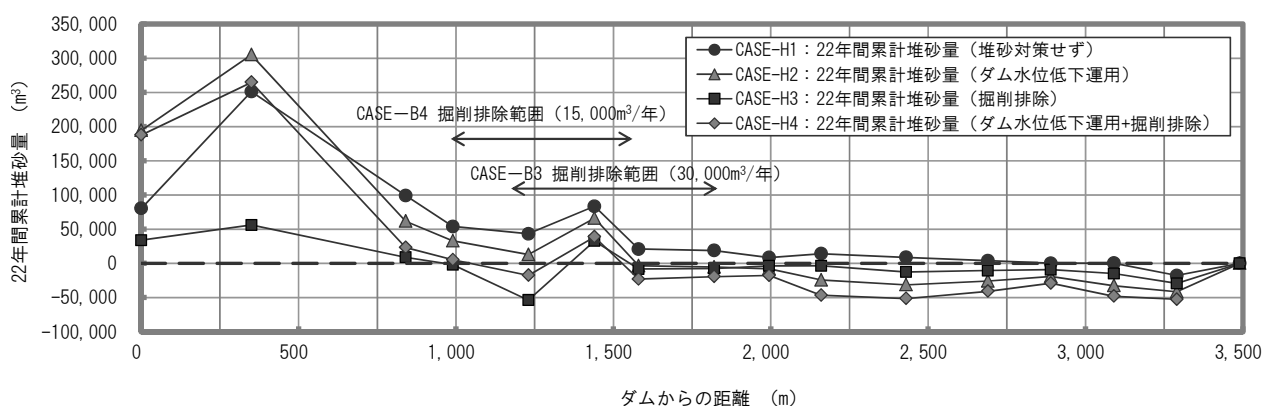
表－4.5 H 調整池（中間タイプ）河床変動解析検討ケース

ケースNo.	内 容
CASE－H1	今後22年間、堆砂対策を実施せず
CASE－H2	今後22年間、出水時にダム水位を低下させる運用を行う。流量が500m ³ /secを越えるとゲート開放へ移行しダム水位を低下させる。流量ピーク後150m ³ /secを下回ると水位回復へ移行する。
CASE－H3	今後22年間、毎年30,000 m ³ の調整池内堆砂掘削排除を行う。掘削排除はダムからの距離1,200mから1,800mの範囲で行う。
CASE－H4	今後22年間、CASE－H2のダム水位運用に加えて、毎年15,000 m ³ の調整池内堆砂掘削排除を行う。掘削排除はダムからの距離1,000mから1,600mの範囲で行う。

4.3.2 河床変動解析による堆砂対策の物理的有効性評価

図－4.6 は、解析期間 22 年間に堆砂が生じる位置と量を示すものである。全ケースで、調整池上流域において堆砂量増加傾向、ダム付近において減少傾向が見られる。中間タイプは調整池全域に堆砂が生じるものであるが、川タイプと比較してダム高があり、洪水吐高率（ダム高に対する洪水吐越流頂から満水面までの高さの割合）も小さいことから、ダム堤体背面に堆砂が生じる容量がある。

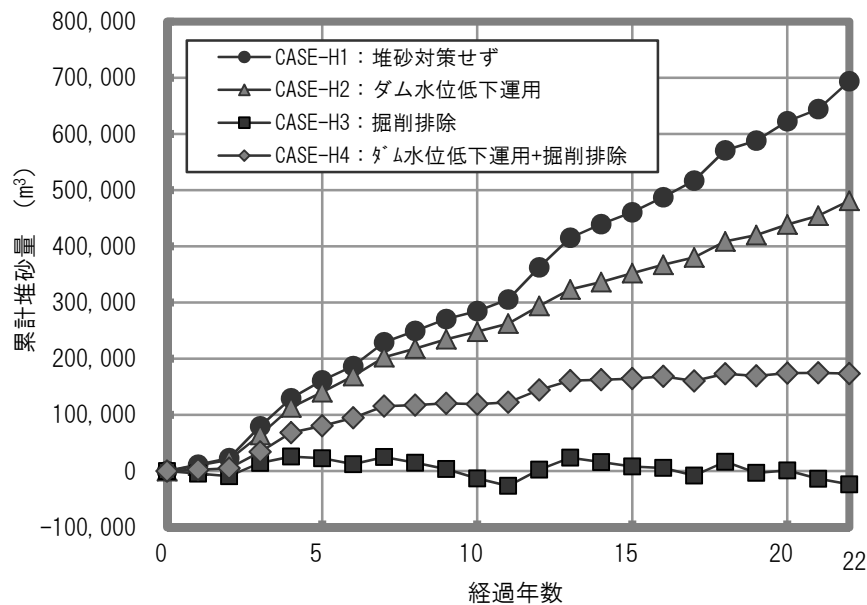
CASE－H1 は、下流域で数十万 m^3 の堆砂、中流域で十数万 m^3 程度の堆砂が生じ、上流域では平衡状態である。CASE－H2 は、ダム付近での堆砂が CASE－H1 と同様に多く、中流域で数万 m^3 程度の堆砂が生じている。このため、必要な中流域での洪水位の上昇抑制が実現できず、十分な堆砂対策とはならない。CASE－H3 は、平均年間堆砂量相当である $30,000\text{m}^3$ を掘削排除することから、おおよそ現在河床を維持し、中流域の洪水位の上昇抑制を達成する。CASE－H4 は、ダム付近で数十万 m^3 近い堆砂が生じるものの、中流域で堆砂が減少し、CASE－H3 と同じく中流域の洪水位の上昇抑制を達成する。



図－4.6 H 調整池（中間タイプ）河床変動解析結果（位置別 22 年間累計堆砂量）

図－4.7 は、解析期間 22 年間の調整池内累計堆砂量の経年変化を示すものである。CASE－H1 は、22 年間で年間平均 $30,000\text{m}^3$ 程度の堆砂進行が見られる。CASE－H2 は、出水時にダム水位低下運用を行うものの、ダム付近の堆砂が進行するため、堆砂量は毎年 $20,000\text{m}^3$ 程度増加する。CASE－H3 は、累計堆砂量が現状のまま維持され、毎年 $30,000\text{m}^3$ の掘削排除による対策が継続的に有効であることを示している。CASE－H4 は、対策開始 13 年目以降、累計堆砂量が $180,000\text{m}^3$ 程度で維持されており、ダム水位低下運用と掘削排除の組み合わせによる対策が継続的に有効であることを示している。

河床変動解析により、中間タイプである H 調整池においては、ダム水位低下運用による堆砂対策だけでは不十分であり、掘削排除による対策、またはダム水位低下運用と掘削排除の組み合わせによる対策の有効性が示された。



図－4.7 H調整池（中間タイプ）河床変動解析結果（累計堆砂量経年変化）

4.3.3 ダム水位低下運用による堆砂対策の経済性評価

表－4.6 は表－4.4 と同様に、ダム水位低下運用のみによる堆砂対策、掘削排除による堆砂対策、およびダム水位低下運用と掘削排除の組み合わせによる堆砂対策について、それぞれに要する費用を整理したものである。

CASE－H2 は、費用は小さいものの堆砂対策として不十分である。堆砂対策として有効である CASE－H3 と CASE－H4 を比較すれば、対策を掘削排除のみにより行う CASE－H3 よりも、ダム水位低下運用により水の流れを利用する CASE－H4 の方が費用を年間数千万程度小さくできることが分かった。

これらの結果から、中間タイプの発電用ダム調整池においては、出水時にダム水位を低下させる運用のみでは堆砂対策として不十分であり、ダム水位低下運用に加えて掘削排除を実施することにより、持続的な堆砂対策が実現することになり、さらに掘削排除のみによる堆砂対策よりも経済的に有利であることが示された。

表－4.6 H調整池（中間タイプ）堆砂対策費用（今後30年間）

対策方法	項 目	30 年間の費用
ダム水位低下運用 (CASE－H2)	排砂に伴う減電	300
	洪水吐・護岸補修	210
	補修に伴う減電	105
	調査検討（河川影響他）	430
	合 計	1,045
掘削排除 (CASE－H3) 掘削数量：30,000m ³ /年	掘削運搬土捨（水中掘削）	4,500
	揚土場等浚渫設備工	140
	土捨場整備	510
	調査検討（土捨場他）	80
	合 計	5,230
ダム水位低下運用 ＋掘削排除 (CASE－H4) 掘削数量：15,000m ³ /年	排砂に伴う減電	300
	洪水吐・護岸補修	210
	補修に伴う減電	105
	掘削運搬土捨（水中掘削）	2,700
	揚土場等浚渫設備工	140
	土捨場整備	390
	調査検討（河川影響、土捨場他）	510
	合 計	4,355

単位：百万円

4.4 池タイプ調整池におけるダム水位低下運用を主とした堆砂対策

4.4.1 F 調整池（池タイプ）の概要

池タイプで調整池の堆砂対策検討の対象として F 調整池を設定する。F 調整池は電源開発株式会社が保有する 5 つの池タイプの調整池で唯一堆砂対策を必要としている地点であり、流入土砂量が多いためダム湖寿命が短く、ダム湖回転率は 50 程度である。堆砂対策の主たる目的は洪水被害リスク抑制であり、掘削排除を行っている。

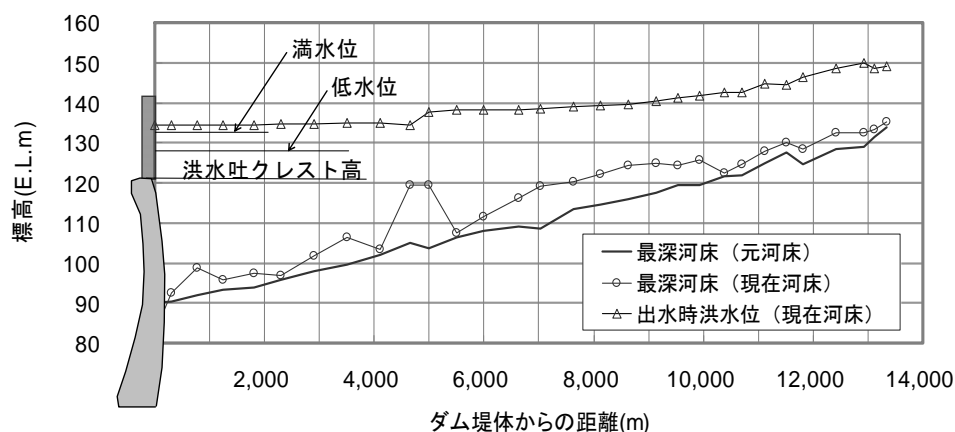
F 調整池の諸元を表－4.7、貯水池平面形状、貯水池縦断形状等を図－4.8 および図－4.9 示す。F 調整池の平成 22 年堆砂量は 11,591 千 m³（全堆砂率 27.0%）、年間平均堆砂量は約 240 千 m³である。F 調整池の特徴は、図－4.8 および図－4.9 に示すように、ダム上流 5,000m の地点に顕著な土砂流入をもたらす支川が流入していることである。この支川土砂流入は調整池内に凸形状の堆砂をもたらし、洪水位上昇の要因となっていることが縦断形状から分かる。ダムから 5,500m の地点に流入している支川からの土砂流入は少ない。また、ダムからの距離 7,000m から 10,000m の区間にも堆砂が多く、同じく洪水位上昇の要因となっている。

表－4.7 F調整池（池タイプ）の諸元

項 目	内 容
総貯水量	43,000 千 m ³
流域面積	801km ²
建設後経過年数	49 年
堆砂量	11,591 千 m ³
全堆砂率	27.0%
調整池ダム高×ダム長	76m×211m



図－4.8 F 調整池（池タイプ）の平面形状



図－4.9 F 調整池（池タイプ）の河床縦断形状および洪水位

F 調整池では、洪水被害のリスク抑制を目的として、年間約 130 千 m^3 程度の掘削排除（陸上）を実施している。しかし、流入土砂量が多いため、当面の洪水位上昇抑制が限度である。また、掘削排除した堆砂は土捨場へ運搬処理しているが、山間部に土捨場用地を継続的に確保していくことは困難であり、土捨場に頼らない持続性のある堆砂対策が必要な状況である。

4.4.2 F 調整池（池タイプ）の堆砂対策

図－3.26 によると F 調整池のように調整池上流域・末端、および調整池内に堆砂があるような場合、掘削排除・浚渫、ダム水位運用によるフラッシング、設備対応となる排砂バイパスや貯砂ダム、等の様々な対策が実施されていることが分かる。また、図－3.27 に示される通り、貯水池回転率の大きな発電用ダム調整池では堆砂対策としてフラッシング排砂や排砂バイパスが適用可能である。

これら既往の研究成果と現地条件等を基に堆砂対策候補を選定すると、掘削排除（陸上・水中）、出水時ダム水位低下運用、排砂バイパス設置（設備対応）の 3 つが挙げられる。掘削排除は調整池内のどの位置の堆砂でも排除することが可能であるが、F 調整池はダムおよび調整池の規模が大きく、ダム水位低下運用および排砂バイパス設置はそれぞれ単独では効果の及ぶ範囲が限定的となってしまう。F 調整池では出水時にダム水位を低下させても、調整池全域で大きな掃流力を得ることはできない。一方、排砂バイパスは地形的な制約からダムから 5,000m 地点の支川からダム下流の区間のみが設置可能である。よって、出水時ダム水位低下運用と排砂バイパス設置は単独で十分な堆砂対策とはなりえず、他の対策方法と組合せる必要がある。表－4.8 に同程度の効果が得られる堆砂対策として CASE－F2 から CASE－F5 までの 4 通りの組み合わせを設定し、河床変動数値解析および費用算出により、各対策の比較分析を行う。

表－4.8 F調整池（池タイプ）比較分析堆砂対策ケース

ケース名	堆砂対策内容		
	掘削排除 (陸上・水中)	出水時ダム水位低下 運用※1	排砂バイパス設置※2
CASE－F1	対策を実施せず		
CASE－F2	○ 排除量 160 千 m ³		
CASE－F3	○ 排除量 100 千 m ³	○	
CASE－F4	○ 排除量 60 千 m ³		○
CASE－F5		○	○

※1 調整池上中流域の堆砂および流入土砂を下流域まで掃砂すること目的とし、調整池流入量が1,000m³/secを越えると洪水吐ゲートを解放し、ダム水位を洪水吐クレスト高＋越流深まで低下する。数日間定水位を保持した後、ゲートを閉じ水位回復を開始する。

※2 ダムから5,000mの位置に流入する支川からの流入土砂をダム下流までバイパスするものであり、他地点実績を基に約70%の土砂がバイパスされ、30%は貯水池へ流入すると設定した。

4.4.3 河床変動解析による堆砂対策の物理的有効性評価

河床変動数値解析は一次元不等流混合粒径河床変動モデルを用いて行った。モデルは、粒径 100mm 程度の掃流砂から、浮遊砂、粒径 0.1mm 以下のウォッシュロードまでを扱うものであり、川タイプ、中間タイプ調整池の堆砂対策検討時に使用したものと同様である。なお、モデルの精査は、調整池内堆砂量および河床材料粒度を基に仮設定した流入土砂の量および粒度を調整対象として、平成 4 年から平成 21 年までの 18 年間の流入量、堆砂量、ダム水位、河床位等の実測データを基に行なった。当該 18 年間の間には、F 調整池の既往最大流量 5,231m³/sec の出水、堆砂掘削排除の実績が含まれている。

河床変動数値解析の結果を図－4.10 に示す。堆砂対策を実施しない CASE－F1 を除いて、18 年後の浸水被害リスクの抑制効果が各ケースで得られた。河床位のバラツキはあるものの、浸水リスクの高いダムから 5,000m と 10,000m の地点において必要な洪水水位上昇の抑制効果が得られた。対策を実施しない CASE－F1 では、支川合流点での河床位上昇、本流からの流入土砂による中上流域の河床上昇が生じ、ダムからの距離 4,500m から上流で数 m の洪水水位上昇が生じている。ダム水位低下運用を行う CASE－F3 および CASE－F5 では合流点と中上流域の堆砂が下流方向に移動していることが確認できる。なお、バイパスのみを設置し、ダム水位低下運用を行わない CASE－F4 では、同程度の効果を得るために合流点で 20 千 m³ の水中堆砂排除（陸上では 40 千 m³ の堆砂排除）を行っている。

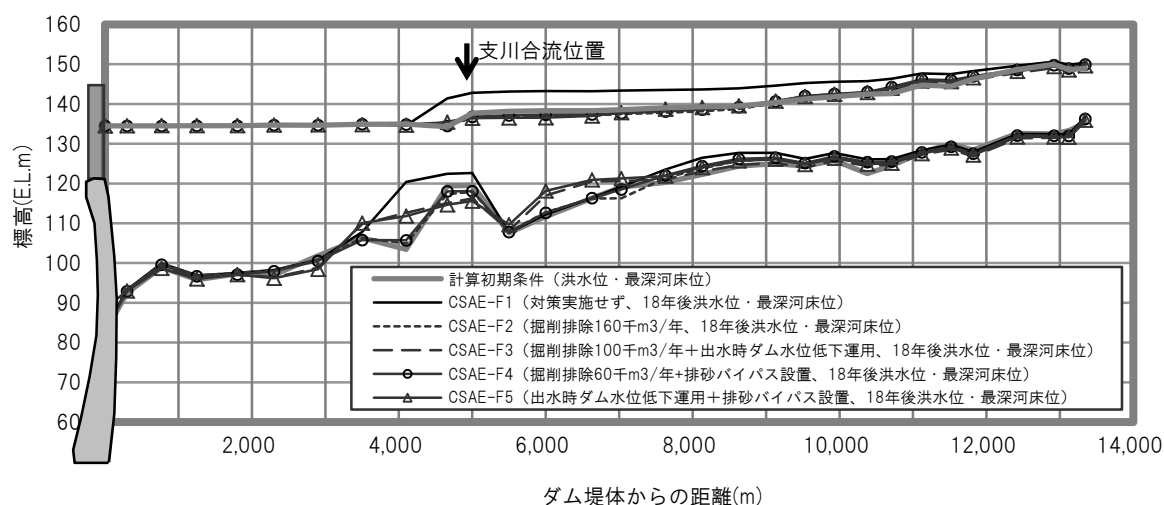


図-4.10 F調整池（池タイプ）河床変動数値解析結果

4.4.4 ダム水位低下運用等による堆砂対策の経済性評価

効果がほぼ同程度である各ケースの堆砂対策を、今後30年間にわたって実施した場合の費用を表-4.9に示す。各費用の単価は、掘削排除は実績を、ダム水位低下運用では発電減少（減電）を、また、排砂バイパスは既往の検討結果^{9) 10)}を参考にし、いずれも社会的割引率は用いていない。表から、掘削運搬土捨て（陸上・水中）に要する費用が大きく、CASE-F2、CASE-F3では総費用の大半を占めていることが分かる。その次に排砂バイパスの設置・メンテナンスに要する費用が大きく、CASE-F4では総費用の2/3、CASE-F5では大半を占めていることが分かる。

掘削運搬土捨て（陸上・水中）を実施しないことが経済性を高める条件であり、CASE-F5は排砂バイパス設置に初期設備投資を要するものの、最も経済性が高い結果となった。また、設備投資は短期的には高コストであるが、費用検討期間を50年、100年と長くすればさらに経済性は高くなる。

F調整池の検討結果から、池タイプ調整池については、支川からの流入土砂を含む複数の流入土砂源を有するような地点で堆砂対策が必要となることが推察される。この場合、流水の力を利用する出水時のダム水位低下運用と排砂バイパス設置（設備対応）を組合せた対策が有効であり、通常行われる掘削排除による対策よりも経済性が高い結果となった。

表－4.9 F調整池（池タイプ）堆砂対策費用（今後30年間）

対策方法	項 目	30 年間の費用
CASE－F2 （掘削排除のみ） 排除量：160 千 m ³	掘削運搬土捨（陸上・水中）	28,140
	掘削運搬土捨設備工	2,850
	調査検討（土捨場）	300
	環境影響対策費用	234
	合 計	31,524
CASE－F3 （掘削排除＋水位低下運用） 排除量：100 千 m ³	掘削運搬土捨（陸上・水中）	17,460
	掘削運搬土捨設備工	1,950
	ダム水位低下運用による減電	480
	調査検討（土捨場）	300
	環境影響対策費用	144
	合 計	20,334
CASE－F4 （掘削排除＋排砂バイパス） 排除量：60 千 m ³	掘削運搬土捨（陸上・水中）	9,660
	掘削運搬土捨設備工	1,350
	排砂バイパス設置・メンテナンス	16,830
	環境影響対策費用	900
	合 計	28,740
CASE－F5 （水位低下運用＋排砂バイパス）	ダム水位低下運用による減電	480
	排砂バイパス設置・メンテナンス	16,830
	環境影響対策費用	900
	合 計	18,210

単位：百万円

4.4.5 排砂バイパスがダム下流河川へ及ぼす影響の評価

排砂バイパスを設置し運用すると、バイパスを通してダム下流に土砂が供給される。その結果、ダム下流河川の河床位および河床材料の変化等が生じる。これらの変化が、河川の治水安全度および河川環境に及ぼす影響について検討を行なった。

4.4.5.1 治水安全度への影響の評価

F ダム調整池への排砂バイパスの設置により、年平均 70 千 m³ の土砂がダム下流河川へ供給されることとなる。F ダムから河口までの約 50km の区間には、河道幅や勾配が変化している箇所がある。そのような箇所に土砂は堆積しやすく、土砂堆積による河床位上昇が洪水リスクの上昇となる可能性がある。よって、供給された土砂がどのように移動・堆積するかを予測するため、ダム下流河川を対象にして河床変動解析を行った。解析は、調整池内と同様に一次元不等流混合粒径河床変動モデルを用い、平成 7 年から平成 20 年まで

の14年間の実測データを基にモデルの精査を行った。ここで、実測データには、熊野川河床調査委員会¹⁾が昭和40年代から当該地点の約40断面について河床位および河床粒度を連続測定してきた記録等を用いた。

排砂バイパス運用開始30年後の区間堆砂量および出水時洪水水位の変化を図-4.11に示す。図から、河口から28kmから50kmまでの区間で洪水水位上昇が生じていることが分かる。河口から45kmより上流では50cm以上の上昇が生じているが、この区間はダム完成後に河床材料が抜けて大きく河床低下していた場所である。河道内の堆砂量については、ほぼ全域に生じているが、ダムに近いほど多くなる傾向がある。

洪水水位が上昇している区間で周辺に道路、橋梁等の社会資本があり対策が必要となるのは、河口から28kmから45kmまでの区間であり、その区間の30年間の堆砂量は1,230千 m^3 である。河口から45kmの地点からダムまでの区間の河川は、両岸が崖であり社会資本は存在しない。洪水水位上昇への対策として、掘削排除することを考えると、毎年の必要掘削排除量は年平均約41千 m^3 である。70千 m^3 を排砂して41千 m^3 を下流で掘削することは一見非効率なようであるが、掘削した土砂は河口まで運搬し養浜材として有効利用することを想定する。河口付近の海岸材料の粒度分布はおおよそ掘削する河床材料の粒度分布と整合している。養浜に必要な掘削、海岸までの運搬等の単価は4,100円/ m^3 であり、年間で総額168百万円の費用を要する。この費用を排砂バイパス設置ケースの費用に上乗せしても、排砂バイパス+ダム水位低下運用の方が調整池で掘削排除するケースよりも経済的に有利である。下流河道で掘削排除する土砂は、調整池よりも市街地に近く、建設資材としての市場価値も高く有効利用の可能性も広がり、今後に検討が必要である。

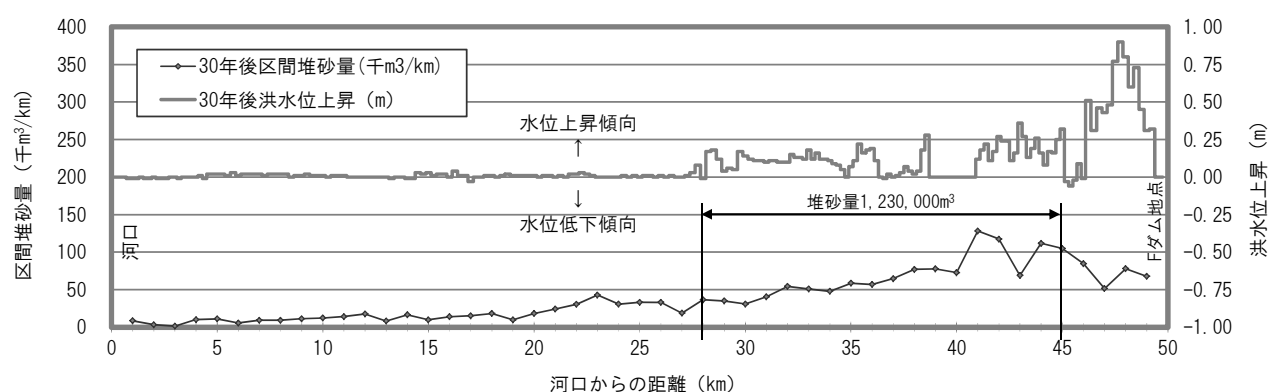


図-4.11 Fダム下流 河川区間堆砂量・出水時洪水水位の変化（30年後）

4.4.5.2 河川環境への影響の評価

F ダム調整池への排砂バイパスの設置により、年平均 70 千 m^3 の土砂(平均粒径 1.14cm、均等係数 3.93) がダム下流河川へ供給されることから、河川環境に影響を与えることが予想される。河床変動数値解析結果を用いて、現在の河床材料平均粒径と 30 年後の平均粒径との比較を行った。河床材料平均粒径の変化を図-4.12 に示す。図から排砂バイパス設置・運用によって、河床材料の平均粒径は、場所ごとに違いはあるものの概ね数 cm 程度であったものが、1cm~2cm 程度に変化していることが分かる。

粗粒化した河床は、中小規模の出水では移動することが無く、河床砂礫に繁茂した藻類が剥離・更新されず、魚類や底生昆虫の餌になりにくい藻種が繁殖することが指摘されている¹²⁾。また、河床が粗い材料ばかりであると、生息する生物種類数が減少し生物多様性を確保できなくなることも指摘されている¹³⁾。最近の研究では、河床材料の空隙率変化に細砂が影響することが指摘されており¹⁴⁾、また、空隙率変化や河床材料の移動し易さが魚類の産卵場適性の指標となる河床の柔らかさに影響することが指摘されていることから¹⁵⁾、上流からの土砂供給と下流河川の魚類繁殖とは相関性があるといえる。このように排砂バイパストンネル設置によるダム下流河川への土砂供給は、河川環境を改善する効果が期待できる。

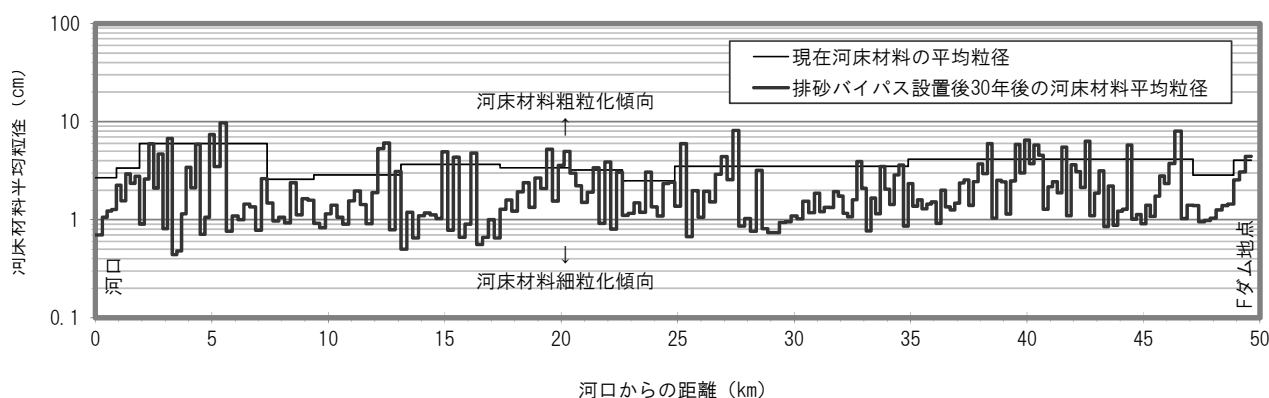


図-4.12 F ダム下流 河床材料平均粒径の変化 (30 年後)

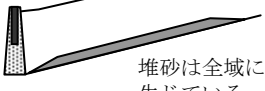

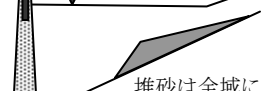
4.5 発電用ダム調整池の堆砂対策

著者らは、発電用ダム調整池の堆砂対策として、掘削排除ではなくダム水位運用を主とする対策について検討してきた。表-4.10 に示す通り、発電用ダム調整池を堆砂形状や洪水時の水面形状により、川タイプ、池タイプ、中間タイプの 3 つに分け、それぞれに堆砂対策を提案した。

発電用ダム調整池は、多くの場合上流に貯水容量の大きな貯水池を有している。調整池

に対する貯水池の総貯水量は平均で 20 倍程度であり、調整池で出水時にダム水位低下運用を実施しても、ダム水位の回復のために特別な運用をする必要はない。また、ダム水位低下運用により一時的な発電停止が生じるものの、出水時であることから、調整池上流に位置する貯水池を使用する発電所や近傍の他水力発電所が高出力で稼働していることが期待でき、電力供給に与える影響は小さいと考えられる。

表－4.10 水力発電用ダム調整池のタイプ別堆砂対策

タイプ	堆砂位置および出水時水位の概略図	平均*ダム高	平均*設計洪水量	平均*洪水吐高/ダム高	対象ダム数* (割合%)	調整池タイプの特徴を活かした堆砂対策
川タイプ	出水時調整池は川状態  堆砂は全域に生じている	27m	8,000m³/s	54%	5 (26%)	・ 出水時にダム水位低下運用を行い、堆砂および流入土砂を洪水吐ゲートからダム下流へ供給する。(スルーシング排砂)
中間タイプ	出水時調整池は池状態と川状態  堆砂は全域に生じている	42m	4,000m³/s	29%	9 (48%)	・ 出水時にダム水位低下運用を行い、堆砂および流入土砂を洪水位上昇に影響しない位置へ導く、または洪水吐ゲートからダム下流へ供給する。掘削排除等によりフォローする。
池タイプ	出水時調整池は池状態  堆砂は全域に生じていない	58m	2,700m³/s	13%	5 (26%)	・ 出水時にダム水位低下運用を行い、堆砂および流入土砂を洪水位上昇に影響しない位置へ導く。必要に応じて設備対応(排砂バイパス、貯砂ダム、等)によりフォローする。

※電源開発株式会社が所有管理する水力発電用ダム調整池についての整理である

4.6 ダム湖の土砂捕捉率、洪水吐高率に関する検討

4.6.1 ダム湖の土砂捕捉率と堆砂対策

川タイプの Z 調整池および中間タイプの H 調整池について、河床変動解析結果を評価するために、ダム湖における土砂捕捉率を検討する。比較のために、伝統的に用いられる Brune 曲線¹⁶⁾およびダム湖に流入する土砂を流域の比流出土砂量から推定して実績ダム堆砂量との関係から推定したものを表-4.11 に示す。ここで推定比流出土砂量は、芦田³⁾、上阪¹⁷⁾らが河川を土砂生産状況に応じてグループに分けたものを基に概略設定しており、T 川水系は $2,000\text{m}^3/\text{km}^2/\text{年}$ 、構造線沿いの河川は $1,000\text{m}^3/\text{km}^2/\text{年}$ 、その他の河川は $500\text{m}^3/\text{km}^2/\text{年}$ とした。

表-4.11 より、河床変動解析結果から算出される土砂捕捉率は、水位低下運用をしない場合と推定比流出土砂量から算出される場合がほぼ一致しており、推定比流出土砂量がほぼ妥当な数値を与えているものと考えられる。Brune 曲線から得られる土砂捕捉率は、貯水池回転率のみから推定されたものであるため、流域特性等が反映された河床変動解析モデルや推定比流出土砂量から得られる土砂捕捉率と常に同程度となるものではない。

Z 調整池、H 調整池ともに、解析結果において、ダム水位低下運用を行うことにより土砂捕捉率が低下していることが分かる。これは、堆砂対策としてダム水位低下運用が効果的であることを示すものである。

表-4.11 Z調整池およびH調整池のダム流入土砂捕捉率

調整池	根拠	条件	土砂捕捉率
Z調整池	Brune曲線	使用開始当初	30.3%
	Brune曲線	現在（平成20年）	28.4%
	河床変動解析結果	ダム水位低下運用実施	0.0%
	河床変動解析結果	ダム水位低下運用実施せず	3.5%
	推定比流出土砂量	$500\text{m}^3/\text{km}^2/\text{年}$	2.0%
H調整池	Brune曲線	使用開始当初	42.5%
	Brune曲線	現在（平成20年）	29.6%
	河床変動解析結果	ダム水位低下運用実施	43.4%
	河床変動解析結果	ダム水位低下運用実施せず	60.4%
	推定比流出土砂量	$500\text{m}^3/\text{km}^2/\text{年}$	62.2%

4.6.2 洪水吐高率と堆砂対策

図－4.13 に、電源開発株式会社が所有管理する調整池（川タイプ、中間タイプ、池タイプ）を対象に、実際の洪水吐高率とダム湖の土砂捕捉率の関係を示す。ここで土砂捕捉率は、Z 調整池、H 調整池と同様に、それぞれのダム湖流域の推定比流出土砂量と実績堆砂量を用いて算出したものを用いている。

プロット分布状況から、土砂捕捉率は洪水吐高率が低い範囲で 100% 近くであるが、洪水吐高率が 50% 程度まで増加すると土砂捕捉率が 0% 程度（土砂スルーシグの実現）となる。現状の洪水吐形状で土砂捕捉率が 0% 付近になっているのは、川タイプの調整池が多い。Z 調整池および H 調整池の解析結果における土砂捕捉率との整合性が高いことから、これらのプロット値については一定の信頼性があると判断できるが、推定流出土砂量の設定はあくまでも概略値であることに注意が必要である。

H 調整池ダムの現状の洪水吐では、ダム水位低下運用によって土砂捕捉率が 60% 程度（CASE－H1）から 40 数% 程度（CASE－H2）に改善する。しかし、これだけでは洪水位の上昇が抑制されず、堆砂対策としては不十分である。そこで、H 調整池の洪水吐を改造して現状よりも切り下げ、洪水吐高を増加させた場合の今後の 22 年間について河床変動解析による比較計算を行った。解析ケースを表－4.12、得られた洪水吐高率と土砂捕捉率の関係を図－4.14 に示す。

表－4.12 H調整池（中間タイプ）洪水吐高検討河床変動解析ケース

ケースNo.	内 容
CASE－H5	洪水吐クレストを3.0m下げて（洪水吐高率34.2%）、今後22年間、出水時にダム水位低下運用を行う。
CASE－H6	洪水吐クレストを4.0m下げて（洪水吐高率36.8%）、今後22年間、出水時にダム水位低下運用を行う。
CASE－H7	洪水吐クレストを5.5m下げて（洪水吐高率40.8%）、今後22年間、出水時にダム水位低下運用を行う。

図-4.13のグラフ中に示される点線が示すとおり、洪水吐高率の増加(CASE-H5、CASE-H6、CASE-H7)にともない、土砂捕捉率はさらに低下することがわかる。洪水吐高率が40%程度(CASE-H7)となるように洪水吐を改造した場合、捕捉率0%が達成され、中間タイプのH調整池も川タイプと同様な土砂スルーシングが実現することとなる。

H調整池において洪水吐高率を40%にするためには、現在の洪水吐クレストを5.5m低下させることが必要であり、洪水吐改造には一時的に多大な費用を要する。しかし、表-4.6に示したように、堆砂対策として掘削排除を行う場合の費用は年間175百万円(5,230百万円÷30年)であるのに対し、ダム水位低下運用のみを行う場合の費用は年間35百万円である。その差額が年間140百万円と大きいこと、および今後の発電所の持続的使用を考えると、洪水吐改造は経済性のある対策と考えられる。

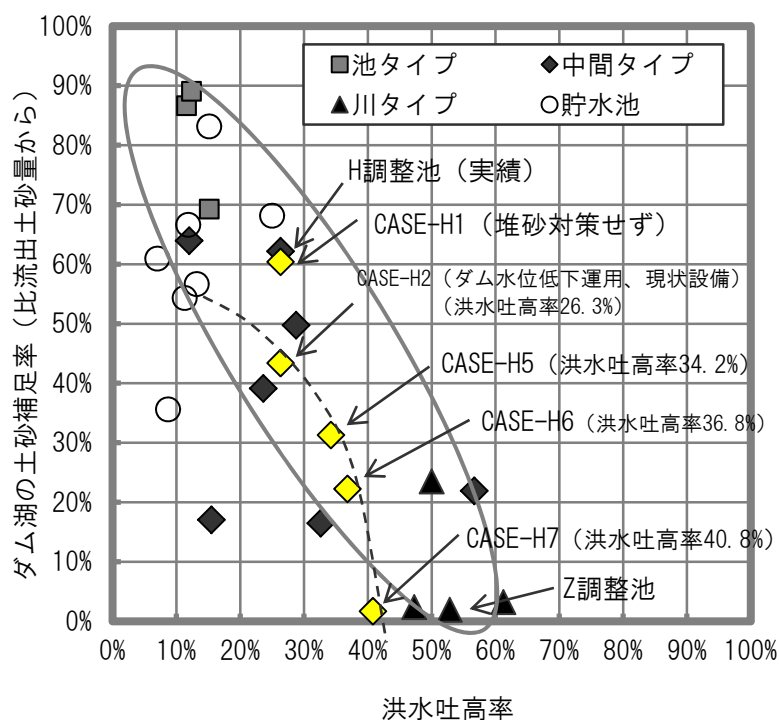


図-4.13 洪水吐高率と流入土砂捕捉率との関係

4.7 まとめ

調整池の堆砂問題に対し、調整池を特徴に応じてタイプ分けし、それぞれに堆砂や設備の特徴を利用する対策を検討し、表－4.10 に示す対策方法を考案・提示した。これらの対策については、タイプ毎にそれぞれ物理的有効性と経済性を検証した。これらの検討を通して得られた成果を以下に示す。

- ・ 発電用ダム調整池は、調整池内の堆砂形状、出水時の水面形から、川タイプ、池タイプ中間タイプの3つに分けることができ、堆砂対策についてはそれらの特性を踏まえてタイプそれぞれに適した方法で行うことが有効である。
- ・ 発電用ダム調整池の堆砂対策は、上流に貯水池を有していることから、ダム水位を低下させても水補給を受けることができる（上流に貯水池が無い場合でも、貯水池回転率が高く、水の補給はある）。この条件を踏まえ、3つのタイプのそれぞれにダム水位低下運用を主とする堆砂対策を考案した。
- ・ 考案した堆砂対策について、河床変動数値解析により物理的有効性を確認し、さらに費用計算により経済的に有利であることを確認した。
- ・ 持続的に設備を使用していくことを考えた場合、排砂バイパスの設置、洪水吐改造等の設備対応による堆砂対策についても、30年程度の期間で経済性評価をすると有利となる。

参考文献

- 1) 江崎一博：貯水池の堆砂に関する研究，土木研究所報告 129 号，1966.
- 2) Strand, R.I., and Pemberton, E.L. : Reservoir Sedimentation, In Design of Small Dams. U.S. Bureau of Reclamation, Denver, 1987.
- 3) 芦田和男ら：ダム堆砂に関する研究，京大防災研究所年報第17号B，1974.
- 4) 芦田和男，道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第 206 巻，pp.59－69，1972.
- 5) 芦田和男，道上正規：浮遊砂に関する研究（1）－河床付近の濃度－，京大防災研究所年報第 13 号 B，1970.
- 6) Lane, E. W. and Kalinske, A. A. : Engineering calculation of suspended sediment, Trans. A.G.U., 22, 1941.
- 7) 富田邦裕，角哲也ら：河川における総合土砂管理の経済評価－矢作川におけるダム長寿命化と環境改善を組み合わせた費用便益評価－，河川技術論文集，第 16 巻，2010.
- 8) 国土交通省：公共事業評価の費用便益分析（共通編）に関する技術指針，2009.
- 9) （財）ダム水源地環境整備センター：ダムの堆砂対策技術ノート－ダム機能向上と環境改善に向けて－，2008.
- 10) （社）日本大ダム会議土砂管理分科会：土砂管理分科会報告書－貯水池の土砂動態と土砂制御法－，大ダムNo.212，pp12－129，2010.
- 11) 熊野川河床調査委員会：熊野川河床調査委員会報告書，2005.
- 12) 池淵周一編著：ダムと環境の科学 I－ダム下流生態系－：京都大学学術出版会，2009.
- 13) 竹門康弘：貯水ダムが下流域生態系を及ぼす影響評価～流況変化・土砂供給減少による底質環境と低生生物群集の応答～，京都大学防災研究所年報第46号B，2003.
- 14) 藤田正治，堤大三：河床材料の空隙率の変化を考慮した河床変動モデルとその適用，河川技術論文集第14巻，2008.
- 15) 鈴木崇正，角 哲也，竹門康弘，中島佳奈：土砂供給に伴うアユ産卵環境の変化予測に関する研究，京大防災研究所年報第54号B，2011.
- 16) Brune, G. M. : Trap efficiency of reservoirs, Trans. AGU, 34-3, pp.407-418, 1953.
- 17) 上阪恒雄：貯水池の土砂管理,ダム技術 No.159, pp.4-23, 1999.

第五章 水力発電用ダム貯水池の堆砂対策

第三章で、水力発電用ダム貯水池において、堆砂進行により発電運用に影響が生じつつあることを述べた。本章では、その影響について定量的評価を行い、堆砂対策の方法について論じる。

5.1 水力発電計画

水力発電用貯水池は、季節的な降雨により流出してくる河川水を貯水し、季節的な流量の過不足を調整する役割を担う。そのため、貯水池は式 (5.1)、式 (5.2)、および式 (5.3) に示す「調整率」、「補給率」、「補給持続日数」に関する 3 つの条件を満たすことが望ましいとされている¹⁾。

調整率

$$\frac{V}{R} \times 100 \geq 20(\%) \quad (5.1)$$

補給率

$$\frac{V}{R/365} \times 100 \geq 150(\%) \quad (5.2)$$

補給持続日数

$$\frac{V}{Q} \geq 30(day) \quad (5.3)$$

ここに、 R は年間総流入量 ($\text{m}^3/\text{sec} \cdot \text{day}$)、 V は有効貯水容量 ($\text{m}^3/\text{sec} \cdot \text{day}$)、 Q は発電所最大使用水量 (m^3/sec) を示す。

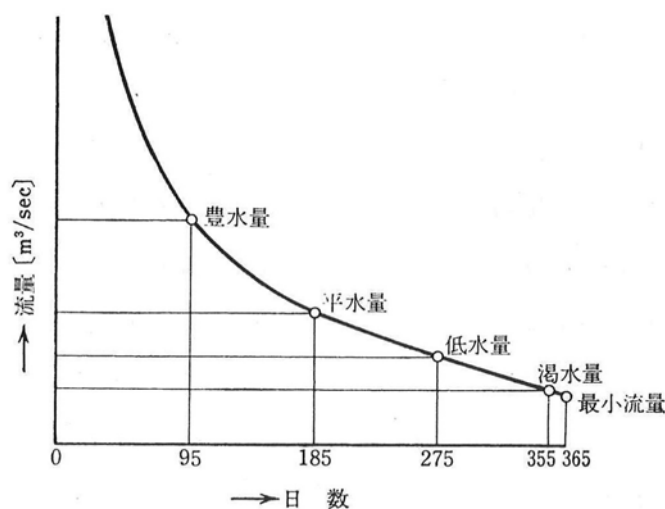
調整率、補給率、補給持続日数の 3 項目について、有効貯水容量が大きいほど、貯水池機能が高くなることが分かる。また、年間総流量が大きいほど、貯水機能は相対的に小さくなる。発電所最大使用水量については、小さいほど補給持続日数は大きくなるものの、発電所最大使用水量は、主として水力計画の経済性の面から確定するものであり、補給持続日数を確保するために発電所最大使用水量を小さくすることはない。

3.6 において貯水池内の堆砂が進行した場合、ダム放流が増えることにより水使用率が低下することをシミュレーションにより示した。また、出水時だけでなく渇水時の水使用についても、貯水容量が小さいため水使用にともなうダム水位の低下が早くなり、その結果、水使用を抑制的に行うこととなるため水使用率は低下する。

このような観点から水力発電計画においては、年間総流入量のみならず、河川の流況特性を考慮することが重要となる。河川の流況特性を表現する際には、流況曲線を用いる場

合が多く、その内容を図－5.1 および表－5.1 に示す¹⁾。流況曲線における流量（ m^3/sec ）は、日平均流量を示す。

流込式発電所の計画においては、最大使用水量を豊水量程度に設定することが適当であるとされている。日本国内においては、昭和初期から 1960 年代初期までの間は、いわゆる水主火従型のエネルギー構成であり、水力はベース供給を担う電源、火力はピーク対応の電源という役割であった。よって、当時の貯水池式発電所の計画時には、平水量を最大使用水量とするのが基本であった²⁾。しかしながら、水力発電計画において実際に行われた方法は、電力需給状況を踏まえ、有効貯水量、最大発電使用水量を変化させ、もっとも経済性の高い仕様・構成に設計するというものであった。3.6 で分析対象にした 7 つの貯水池について、最大使用水量、常時使用水量と豊水量、平水量、1 年間で 35 日以上はこれを下回らない流量（35 日流量）、65 日以上はこれを下回らない流量（65 日流量）を求めて、表－5.2 の通り整理した。また、表－5.2 を基に、35 日流量、65 日流量、平水量、豊水量と使用水量（最大・常時）との関係を図－5.2 の通り整理した。



図－5.1 流況曲線¹⁾

表－5.1 流況曲線における水量¹⁾

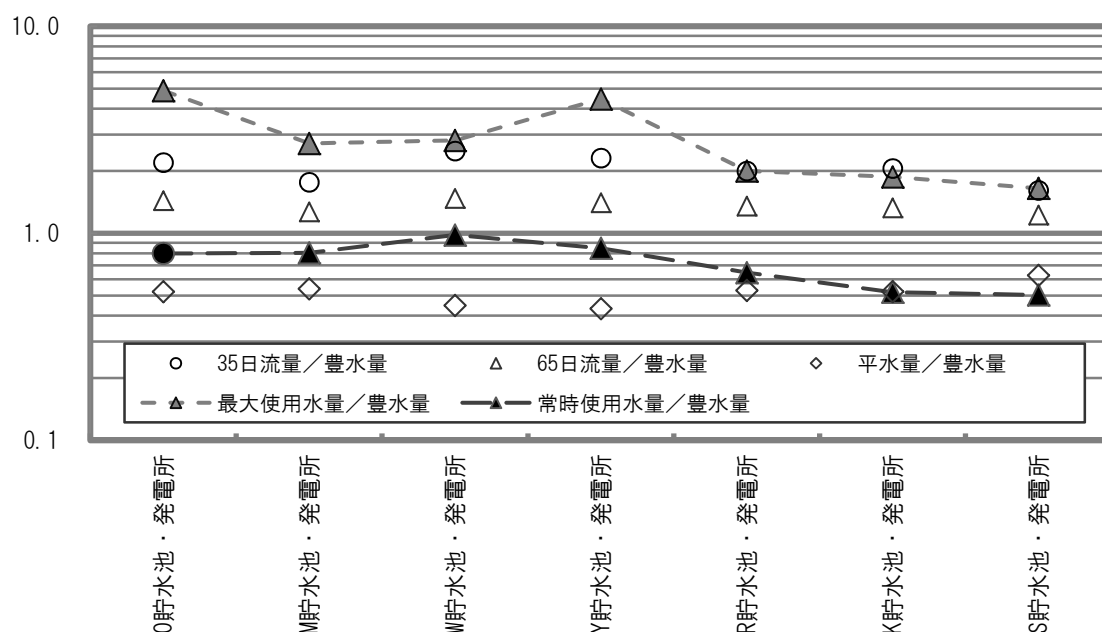
水 量	内 容
豊水量	1 年のうち 3 ヶ月間（95 日間）はこれを下回らない流量
平水量	1 年のうち 6 ヶ月間（185 日間）はこれを下回らない流量
低水量	1 年のうち 9 ヶ月間（275 日間）はこれを下回らない流量
渴水量	1 年のうち 355 日間はこれを下回らない流量

表－5.2 発電使用水量と流況との比較

貯水池（地域）	最大使用水量※1 (m³/sec)	常時使用水量※2 (m³/sec)	35 日 流量 (m³/sec)	65 日 流量 (m³/sec)	豊水量 (m³/sec)	平水量 (m³/sec)
O 貯水池（北 陸）	249	40.71	111.92	73.32	50.92	26.60
M 貯水池（北 陸）	130	38.49	84.47	60.72	47.82	25.80
W 貯水池（紀伊南部）	21	7.33	18.67	11.01	7.47	3.35
Y 貯水池（四国南部）	50	9.51	25.91	15.77	11.22	4.85
R 貯水池（北 陸）	28	9.04	28.00	18.96	14.00	7.42
K 貯水池（紀伊南部）	60	16.64	65.92	42.58	32.04	16.76
S 貯水池（中 部）	306	93.45	298.92	227.21	185.46	116.08

※1 最大使用水量：水力発電所が使用できる最大の水量

※2 常時使用水量：河川の渴水量から、灌漑、漁業、観光などのために発電に利用できない水量を差し引いた水量に貯水池設置効果による増加量を加えた水量

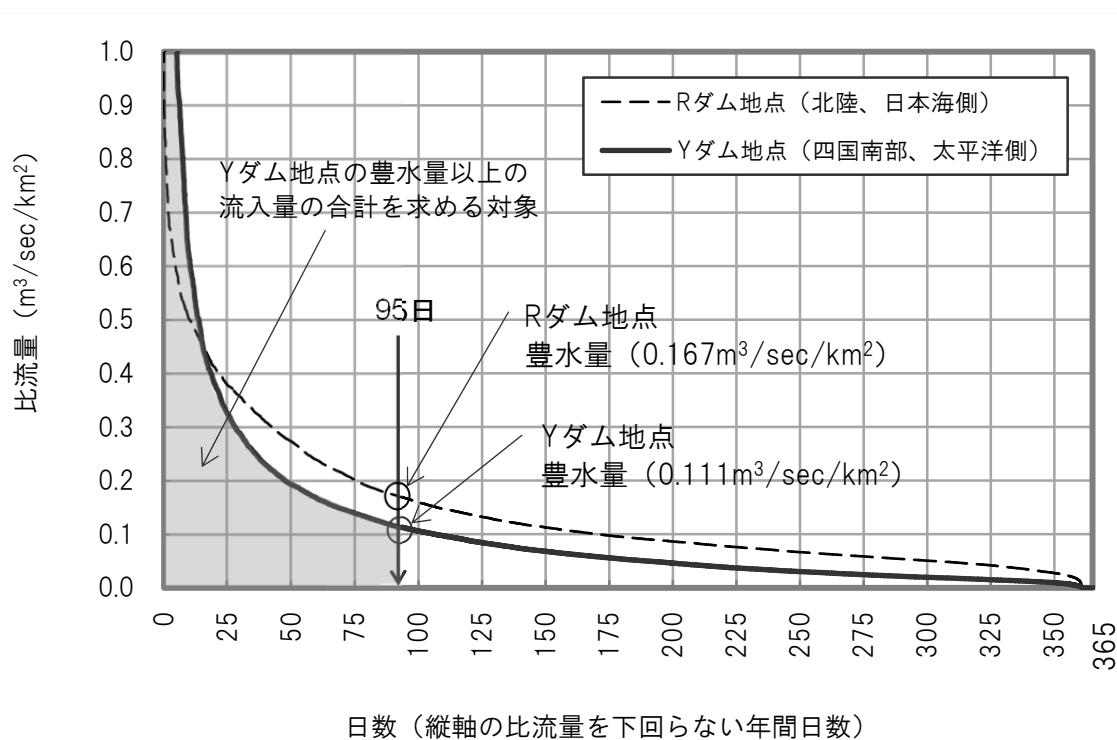


図－5.2 35 日流量、65 日流量、平水量、最大使用水量、常時使用水量と豊水量との関係

表および図から、常時使用水量と豊水量が概ね一致していることがわかる。常時使用水量とは河川の渴水量から、灌漑、漁業、観光などのために発電に利用できない水量を差し引いた水量に貯水池設置効果による増加量を加えたもので、大体において年間に使用できる水量である。出水時や流入量が大きい場合の水利用には最大使用水量が影響するものの、年間を通じた常時の水使用においては、豊水量程度である常時使用水量程度と有効貯水容量との関係の影響が大きいこととなる。

3.6 で論じた水使用率は、有効貯水容量と貯水池流入水の流況との関係だけでなく、設備能力である最大発電使用水量の大小にも影響を受ける。これが大きければ有効貯水容量にあまり依存せずに水使用率が確保できる。一般に水力発電施設では、流れ込み式の場合で、年間流況に基づいて流量設備利用率（実際の年間発電使用水量積算値／（最大使用水量×365 日））が 45～60% となるように計画される³⁾。一方、貯水池式では、これにマスカーブを用いた必要有効貯水池容量を加味した検討が行われている。

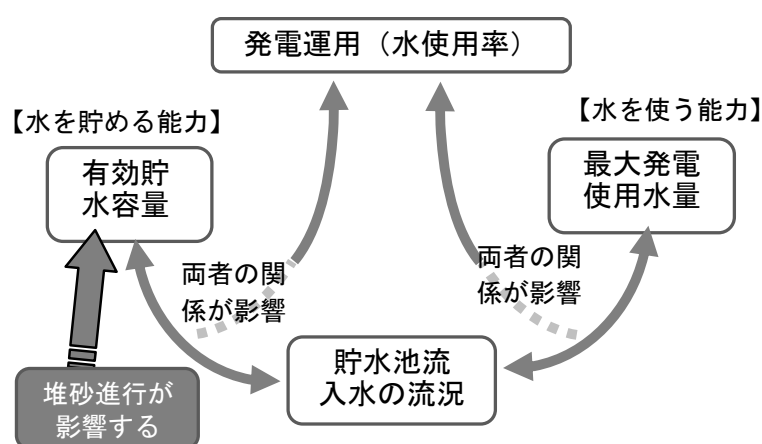
さらに、これらの値は、水力発電ダムの所在する地域の年間の流況特性（日本海側、太平洋側など）にも大きく左右され、特に台風によるような大きな出水の影響が大きい。図－5.3 に 1988 年から 2011 年までの間のデータを用いた R ダム地点（北陸、日本海側）と Y ダム地点（四国南部、太平洋側）の年間流況曲線を示す。これより明らかに Y ダム地点の方が出水の影響が大きく、無効放流が発生しやすいことがわかる。この流況曲線の違いを定量化するために、ここでは発電最大使用水量と豊水量（年間 95 日間はこれより下らない流量）を上回る流量との比率を指標として検討を行った。



図－5.3 R ダム地点と Y ダム地点の流況特性

5.2 発電運用（水使用率）に影響を及ぼす要因の整理

発電運用（水使用率）に影響を及ぼす要因について、これまでの分析結果を基に整理し図化したものを図－5.4 に示す。発電運用は、「貯水池に流入水の流況と有効貯水容量との関係」および「貯水池に流入水の流況と最大発電使用水量との関係」の影響を受ける。水力発電計画時には、これらの関係から、電力需要状況と経済性を踏まえ、発電所の仕様を検討・確定する¹⁾。多くの貯水池は設置から数十年が経過し、計画時に考慮されなかった堆砂進行による有効貯水容量の減少が生じている。次項では、有効貯水容量の減少の影響を評価することを可能とする関係式を導く。



図－5.4 発電運用に影響を及ぼす要因

5.3 発電運用（水使用率）の評価式

7つの発電所（貯水池）の発電運用実績をもとに、発電所の水使用率を「有効貯水容量と流入水の流況との関係」、「最大発電使用水量と流入水の流況との関係」から導く式を、多変量回帰分析により求める。関係式の形は、式（5.4）の通りである。

$$\begin{aligned}
 \text{水使用率（\%）} = & \frac{a1 \times \text{年間総流入量} + a2 \times \text{豊水量以上流入量の合計}}{\text{有効貯水容量}} \\
 & + \frac{a3 \times \text{豊水量以上流入量の合計}}{95 \text{日間最大発電時使用水量の合計}} + b
 \end{aligned} \quad (5.4)$$

水使用率は、年間総流入量と有効貯水容量の関係（調整率）に依存する。また、豊水量以上流量の合計とは、発電所ダム設置地点における流況を示すものであり、7つの貯水池について、豊水量以上流量の合計が年間総流入量に占める割合を求めたものを表－5.3 に示す。

紀伊半島南部、四国南部等の太平洋側の地域で割合が高くなっていることが分かるが、このことは、中小水力発電ガイドブック³⁾に示される太平洋側と日本海側の特徴と同じである。太平洋側のこれらの地域では、3.5で示したとおり全般的に水使用率が小さく、この理由が主として流況によるものであることが分かる。一方、貯水機能を回復・維持することにより、水使用率を改善、維持できるといえる。また、堆砂が進行した場合はその逆の傾向となり、貯水機能の低下とともに水使用率が低下することとなる。

重回帰分析の結果、得られた $a1 \sim a3$ の係数の値および実績と比較を表-5.4に示す。A地点で水使用率が100%をわずかに超えているが、有効容量内堆砂率変化に伴う水使用率変化の傾向を求めるうえでは、問題とはならないと考えられる。相関係数は0.926であり、水使用率を評価する良好な式を得ることができた。

表-5.3 豊水量以上の流入量の合計が年間総流入量に占める割合

貯水池名	豊水量以上流量 ／年間総流入量 (%)
O 貯水池	60.08%
M 貯水池	58.47%
W 貯水池	76.42%
Y 貯水池	74.39%
R 貯水池	58.89%
K 貯水池	67.89%
S 貯水池	52.80%

表-5.4 水使用率計算式の係数および計算結果

発電所・ 貯水池名	係 数	水使用率	
		実 績	計算値
O 貯水池	$a1 = +0.03509$ $a2 = -0.06467$ $a3 = -0.1183$ $b = +1.065$	99.67%	101.79%
M 貯水池		99.11%	97.50%
W 貯水池		97.89%	92.84%
Y 貯水池		89.82%	91.30%
R 貯水池		78.73%	84.35%
K 貯水池		91.22%	90.91%
S 貯水池		78.34%	76.08%

相関係数 0.926

5.4 貯水池堆砂進行が発電運用に及ぼす影響の予測

式(5.4)を用いて、今後、貯水池の堆砂が進行した場合の水使用率を求めた。結果を図-5.5に示す。図から、堆砂が進行することにより水使用率が低下し、発電運用に影響が生じることが分かる。また、同じ堆砂率まで堆砂が進行しても、発電運用に及ぼす影響の程度が地点によって異なっていることが分かる。北陸および中部地域に設置されている4つの貯水池(O地点、M地点、R地点、S地点)では、堆砂率が50%程度まで上昇しても、水使用率は殆ど変化しない。一方、紀伊南部および四国南部に設置されている3つの貯水池(W地点、Y地点、K地点)は、堆砂率が0%から50%程度に上昇すると水使用率が10%程度低下することとなる。特にK地点では15%程度の大幅な水使用率の低下となる。

堆砂率が10%程度までの低い範囲では、R地点、S地点、Y地点の水使用率は90%程度で同じレベルにあるものの、堆砂進行にともない、Y地点の水使用率が残りの2地点に比べて大きく低下する。これは、堆砂進行により有効貯水容量が減少した場合に、紀伊南部や四国南部などの豊水量以上の流入量の合計が多い地域においては、貯水池運用に大きく影響するためと考えられる。一方、年間を通じて比較的平均的な流入のある北陸、中部などの地域では、有効貯水容量の減少が直ちに水使用率の低下につながるとはいえない。

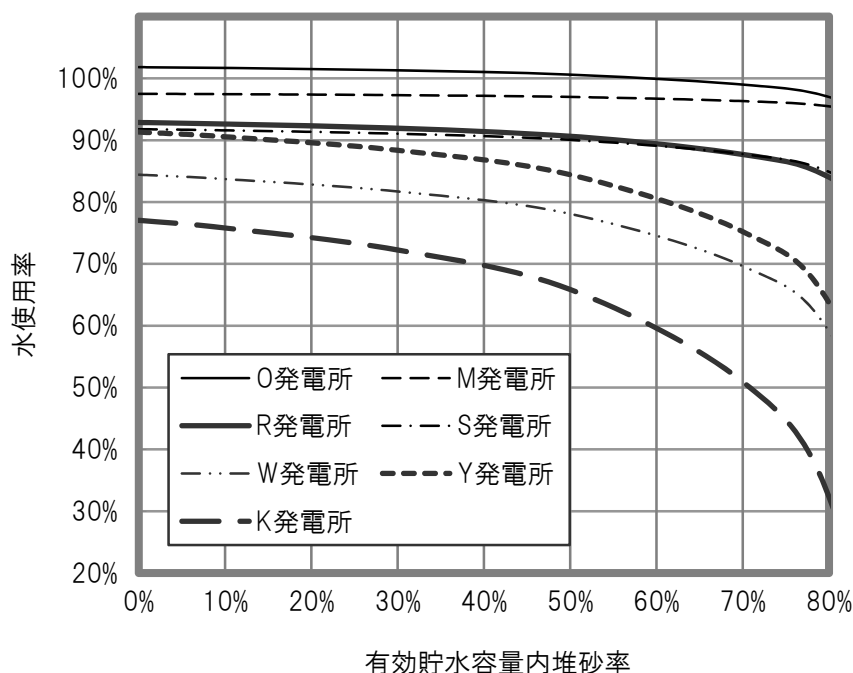


図-5.5 堆砂率と水使用率の将来予測

(社)日本大ダム会議の土砂管理分科会は、2010年に国内のダム堆砂状況を調査した結果、電力ダムについては殆どの地点で有効貯水容量内の堆砂率が10%以下であり、発電運

用への影響は殆ど生じていない、と報告した⁴⁾。この報告と図-5.5に示されるシミュレーション結果とはよく整合する。水使用率は、紀伊南部および四国南部の地域において、堆砂率が30%程度に達して初めて数%程度低下する。それ以外の地域では、堆砂率70%程度になるまで、水使用率は殆ど低下しない。この結果は、西南日本における梅雨や台風などの洪水に大きく左右される水力発電用貯水池ほど、堆砂進行による有効貯水容量の減少が貯水機能に大きく影響することを示す。さらに、今後の気候変動による貯水池流入水の流況の変化の影響も、より大きく受ける可能性があることを示唆している。

5.5 貯水池における堆砂対策の必要性

水力発電設備は、長期間にわたって持続的に使用していくことが求められており、将来に堆砂が進行し発電運用に影響が生じることが予測されるのであれば、早期対策を講じることが有効である。その理由は大きく2つある。

1つ目の理由は、河川にシリーズで設置されている水力発電システムの最上流に位置し、貯水を期待される貯水池が、その貯水機能を低下させた場合、下流に設置されている全調整池の発電運用に影響し、大きな損失につながるからである。

2つ目の理由は、貯水池は、通常大規模なダム湖であり、一度流入した土砂の排除は浚渫を要する等困難である。さらに、設置位置が山間部であるため、排除した土砂は処分地・消費地までの運搬距離が大きく⁵⁾、また、運搬する道路の整備不十分等があるため容易ではない。堆砂進行の影響が生じる前に、堆砂進行速度、有効貯水池容量、発電使用水量、流況等から影響を事前に予測し、早めに対策を講じることが有効である。対策を早く開始することにより、有効貯水容量の多くを温存することができる。

5.6 貯水池における有効な堆砂対策

貯水池における堆砂対策は、山間部に存在しているため、排除した土砂の扱いが調整池と比較してより難しい。また、調整池で有効となる流水の力を利用した土砂管理・堆砂対策については、ダム規模に比して洪水吐きが小さくダム水位の低下が難しいこと、さらに本来の設置目的である季節間の流量調整の役割を果たせなくなることから、実現可能な方法とは言い難い。

貯水池における堆砂対策として、表－5.5 に示す実施可能な4つのケースを設定し、それぞれの経済性を比較する。例えば、土捨場が永続的に確保できるのか、といったような対策の持続性については、ここでは問題としない。経済性比較は300年間の累計費用で行う。また、対策開始の時期を、直ちに開始、25年後に開始、50年後に開始、100年後に開始、150年後に開始と複数設定し、対策開始時期による差についても比較対象とする。

経済性比較においては、堆砂進行による発電運用の影響のために生じる発生電力量の減少を費用化する。よって、比較に用いる総費用は、「堆砂対策費用＋発生電力量減少にともなう料金収入減少額」である。

表－5.5 貯水池堆砂対策のケース

対策ケース	内 容	備 考
対策を実施せず	堆砂対策を実施しない。	
浚渫	毎年の流入・堆積土砂を浚渫船により排除する。	揚土場設置費用計上
貯砂ダム＋掘削排除	貯水池上流端に貯砂ダムを設置し、毎年貯砂される土砂を陸上掘削する。	
排砂バイパス設置	貯水池上流端に排砂バイパスを設置し、毎年の流入・堆積土砂をダム下流へバイパスする。	全量がバイパスされることとする。

5.6.1 貯水池堆砂進行が発電設備経済価値に及ぼす影響

電源開発株式会社の設備で、将来的に堆砂進行の影響を受ける可能性のある、紀伊南部、四国南部の水力発電所のうち、1つの水系に貯水池式発電所、調整池式発電所が設置されているのは、S川（上流でT川とK川に分かれる）、N川の3つの地点である。各水系ごとの年間平均発生電力量、および年間平均発生電力量に日本卸電力取引所における震災前の平均単価を乗じたものを発電所の経済価値とし、表－5.6 に示す。

表－5.6 水力発電設備の経済価値

水 系	発電所構成	年間発生電力量 (平成9年～18年平均)	年間経済価値※ (8.4 円／kWh)
S 川 (T 川)	貯水式発電所＋調整池式発電所	568GWh	4,771 百万円
S 川 (K 川)	貯水式発電所＋調整池式発電所×2	669GWh	5,620 百万円
N 川	貯水式発電所＋調整池式発電所×2	609GWh	5,116 百万円

※ JEPX（日本卸電力取引所）の平成 17 年度から平成 22 年度の間の平均 8.4 円/kwh

表－5.6 から、おおよそ 1 つの水系で年間 50 億円程度の経済価値を生み出すことが期待できることとなり、既に算出した水使用率低下に伴う発生電力量の減少が、この経済価値に影響することとなる。例えば、S 川 (T 川) では、有効貯水容量内の堆砂率が毎年 0.13% 進行するが、式－5.1 を用いて有効容量の減少により低下する水使用率を求め、そのために減少する経済価値は 1 年間で 1,750 千円である。300 年後の累計は 78,750 百万円の電力料金収入の減少となる。

5.6.2 経済性比較における費用計算方法

5.6.1 で得られた水力発電所経済価値減少の予測結果と堆砂対策に要する費用とを比較し、対策の経済性を評価する。対策費用の算出にあたっては、表－5.7 に示すダム水源地環境整備センターの「ダムの堆砂対策技術ノート」⁶⁾に示される値を使用する。

表－5.7 貯水池堆砂対策のケース

項 目	初期投資（設備建設）	ランニングコスト	備考
掘 削	－	掘削 2,500 円／m ³	
浚 渫	－	浚渫 5,000 円／m ³ ※	
揚土場	1.00 億円／基	－	浚渫開始年
貯砂ダム＋掘削	貯砂ダム建設 54 億円／基	掘削 2,500 円／m ³	
排砂バイパス	排砂バイパス建設 132 億円／条	摩耗対策 1.21 億円／年	

※ 年間排除量が 10 万 m³程度であること等を踏まえ、採用する単価を変更した。
(ダムの堆砂対策ノート：20,000 円／m³)

計算を行う地点は、今後の貯水池堆砂進行が発電運用に影響を及ぼす恐れのある、S 川（T 川）の K 貯水池および N 川の Y 貯水池である。それぞれの年間堆砂量（有効貯水容量内）は、18 万 m³ および 9 万 m³ である。

5.6.3 今後 300 年間の累計費用計算結果

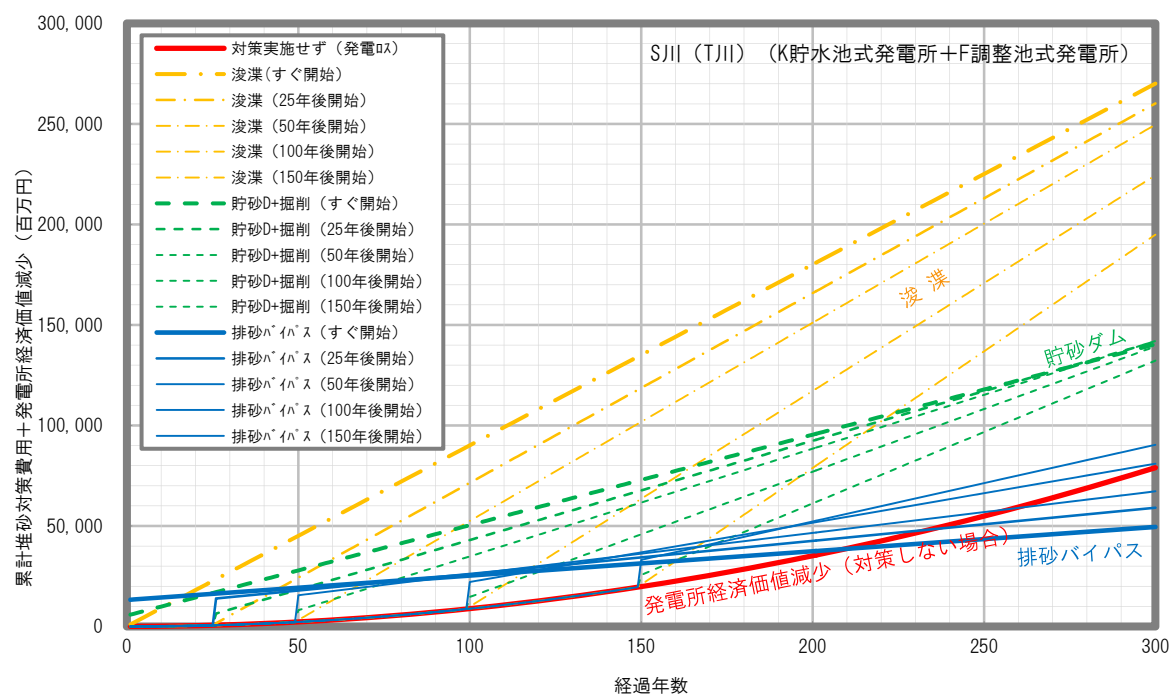
費用計算を行った結果を表－5.8、表－5.9 および図－5.6、図－5.7 に示す。費用計算期間は 300 年であり、その累計金額を表に示しているが、その内容は「対策費用＋発生電力量減少にともなう経済価値減少」である。

表－5.8 貯水池堆砂対策累計費用計算結果（S 川（T 川）、K 貯水池、対象土量 18 万 m³）

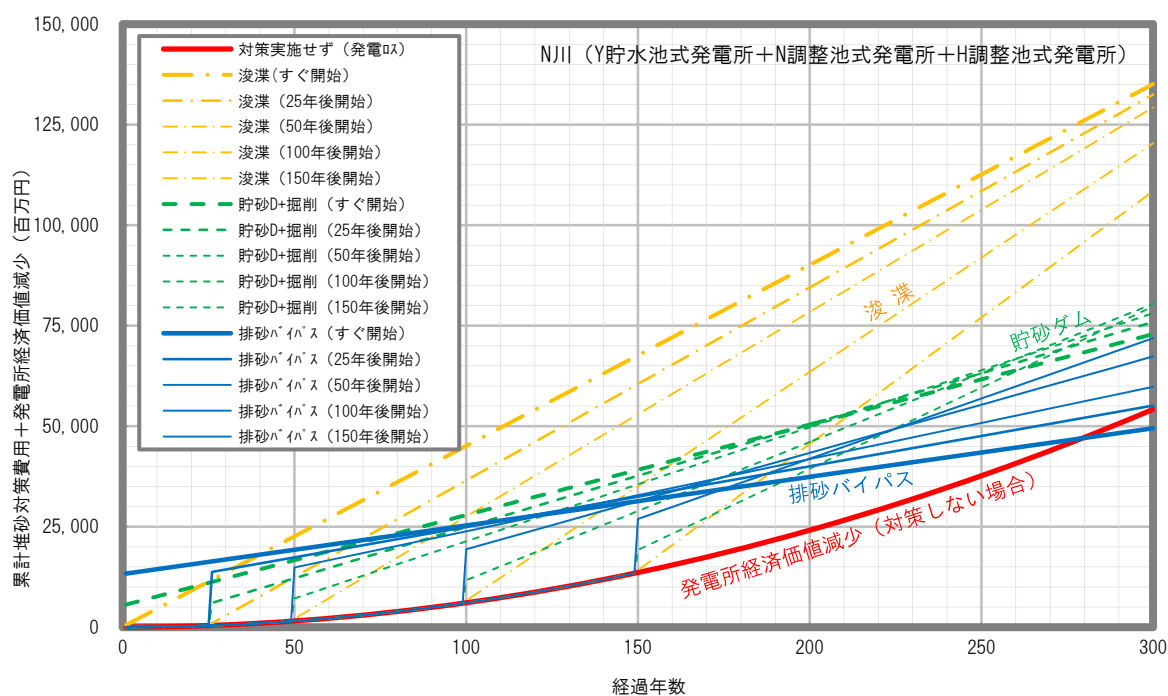
対策開始時期	300 年間の堆砂対策累計費用 (対策費用＋発生電力量減少にともなう経済価値減少)			
	対策せず	浚渫	貯砂ダム＋掘削	排砂バイパス
1 年目から開始	－	270,010 百万円	140,400 百万円	49,500 百万円
25 年目から開始	－	260,200 百万円	141,750 百万円	59,075 百万円
50 年目から開始	－	249,667 百万円	142,017 百万円	67,238 百万円
100 年目から開始	－	224,486 百万円	139,336 百万円	81,007 百万円
150 年目から開始	－	194,938 百万円	132,280 百万円	90,401 百万円
対策（開始）せず	79,013 百万円	－	－	－

表－5.9 貯水池堆砂対策累計費用計算結果（N 川、Y 貯水池、対象土量 9 万 m³）

対策開始時期	300 年間の堆砂対策累計費用 (対策費用＋発生電力量減少にともなう経済価値減少)			
	対策せず	浚渫	貯砂ダム＋掘削	排砂バイパス
1 年目から開始	－	135,100 百万円	72,900 百万円	49,500 百万円
25 年目から開始	－	132,490 百万円	75,915 百万円	55,115 百万円
50 年目から開始	－	129,279 百万円	78,104 百万円	59,800 百万円
100 年目から開始	－	120,369 百万円	80,444 百万円	67,340 百万円
150 年目から開始	－	108,459 百万円	79,784 百万円	71,880 百万円
対策（開始）せず	54,180 百万円	－	－	－



図－5.6 貯水池堆砂対策累計費用計算結果（S川（T川）、K貯水池、対象土量 18 万 m^3 ）



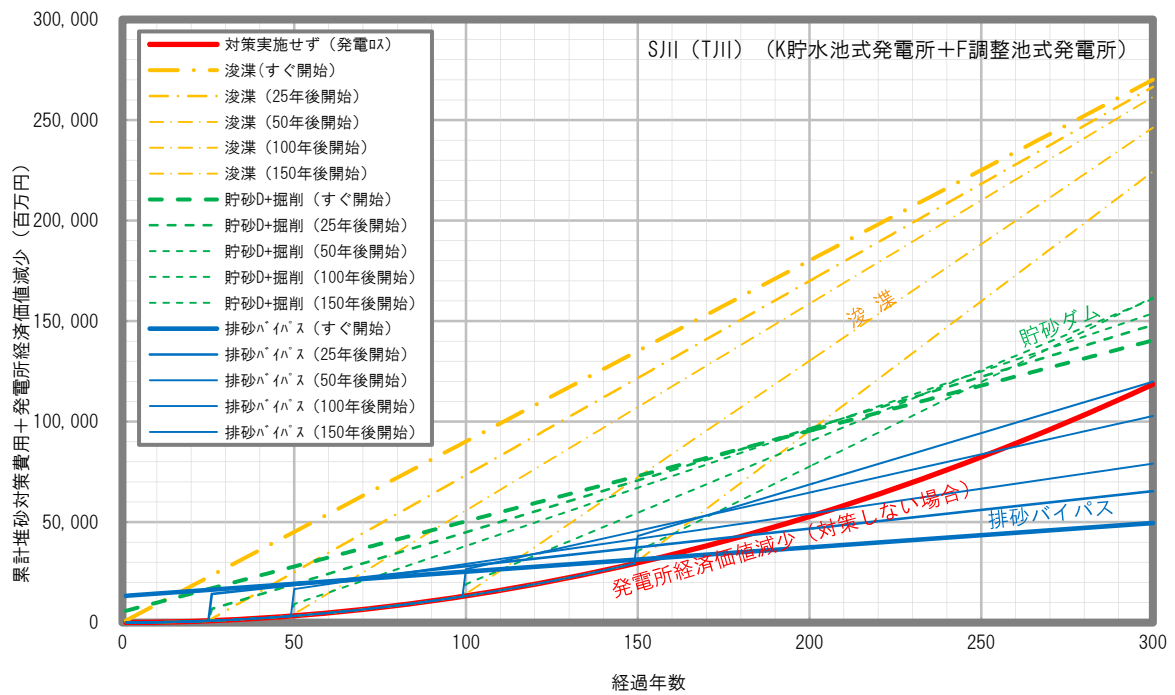
図－5.7 貯水池堆砂対策累計費用計算結果（N川、Y貯水池、対象土量 9 万 m^3 ）

貯水池における堆砂対策費用比較結果から下に示すことが分かる。

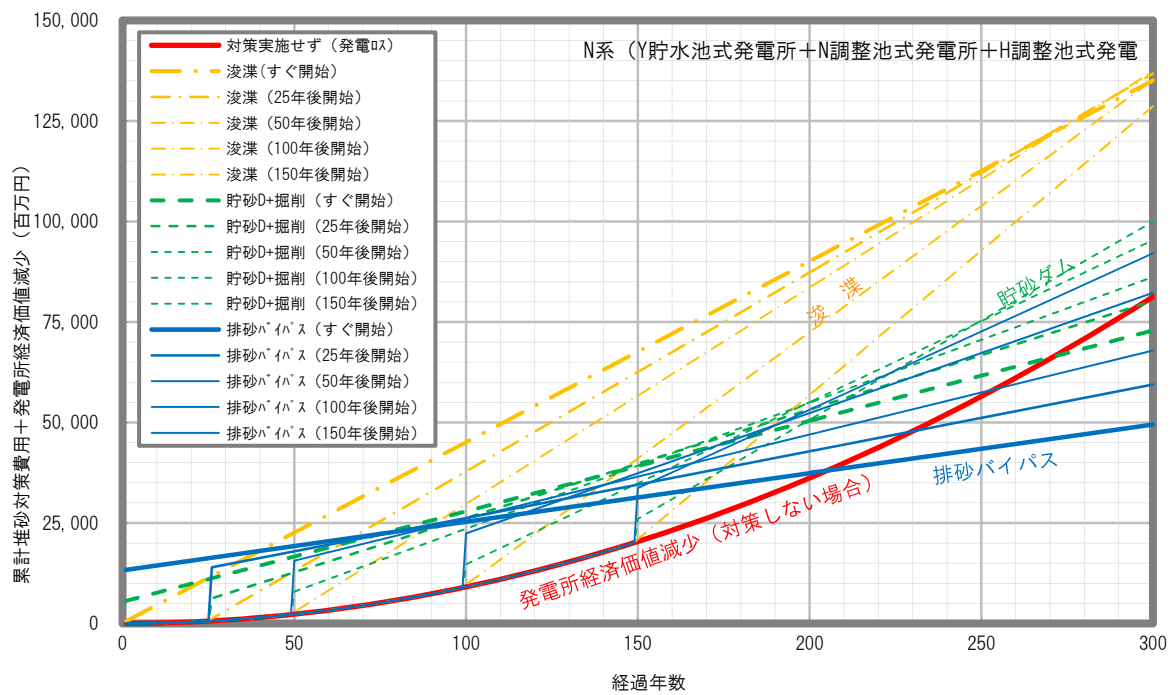
- ・ 300 年の長期間で評価した場合、3 種類の堆砂対策と対策を実施しない場合の中で、最も費用と発電ロスの合計を小さくできる方法は、「排砂バイパスによる堆砂対策を 1 年目から開始する方法」である。
- ・ 浚渫による堆砂対策は開始時期が早いほど、累計費用は大きくなる。また、浚渫による堆砂対策によって防げる発電所経済価値減少は、浚渫に要する費用とバランスしない。
(浚渫費用 > 浚渫によって防げる発電所経済価値減少)
- ・ 貯砂ダム、排砂バイパスによる堆砂対策を実施する場合、初期投資費用はかかるものの、貯水容量のロスを設備導入時点で停止させ、その効果が延々と続くことから、長期的には早く開始するほど、累計費用は小さくなる。

電力料金単価として、平成 17 年度から平成 22 年度の間の JEPX（日本卸電力取引所）での取引単価の平均である 8.4 円/kWh を用いたが、平成 23 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震後、JPEX での取引単価は 12 円/kWh 程度にまで上昇し、現在（平成 24 年 12 月）までその単価程度を維持している。今後、原発事故に限らず、化石燃料の枯渇、不安定な新エネルギーの導入等により、電力料金単価が下降する可能性は殆どなく、上昇していくことが考えられる。

このような状況を踏まえ、ここでは仮に電力料金を現状の 12 円/kWh に設定して、累計費用の試算を行った。その結果を図-5.8、図-5.9 に示す。発電ロスの上昇程度が大きくなり、8.4 円/kWh の際には、S 川（T 川）で約 210 年後、N 川系 260 年後に、排砂バイパス設置による堆砂対策が発電ロスよりも有利となっていたものが、それぞれ、160 年後と 210 年後となり、双方とも 50 年早くなる。



図一5.8 貯水池堆砂対策累計費用計算結果／12 円/kWh (S 川 (T 川)、K 貯水池、対象土量 18 万 m³)



図一5.9 貯水池堆砂対策累計費用計算結果／12 円/kWh (N 川、Y 貯水池、対象土量 9 万 m³)

5.6.4 貯水池における堆砂対策

貯水池における堆砂進行が、発電運用に影響する可能性のある紀伊南部および四国南部の発電所について、実施すべき対策の検討を行なった。その結果、発生する電力ロスを抑制・回避するために、堆砂対策は排砂バイパスや貯砂ダムの設置などの設備対応によって行うことが有効であることが分かった。さらに、対策実施時期を複数設定して費用比較を行なった結果、早期に対策を開始することが、より有利であることが分かった。

5.7 まとめ

水力発電用貯水池について、堆砂進行した場合の影響評価と実施すべき対策について検討・評価した。得られた成果を下に示す。

- ・ 水力発電用貯水池における発電運用（水使用率）は、主として貯水池流入水の流況、有効貯水容量、最大発電使用水量の3つの影響を受ける。これら3つを変数として水使用率を求める式を作成した。
- ・ 作成した式を用いて、貯水池式発電所において堆砂進行した場合の水使用率の変化を予測した結果、季節毎の降水量の差の大きい太平洋側の貯水池式発電所において、堆砂進行にともなって水使用率が低下することが分かった。一方、日本海側の季節毎の降水量の差が小さい地域の貯水池式発電所においては、堆砂進行が水使用率へ比較的影響しないことが分かった。
- ・ 堆砂進行の影響をうける太平洋側の貯水池式発電所を対象に、有効な堆砂対策について検討を行なった。検討は、今後300年間について、堆砂対策費用と発生電力量減少により発電所が生み出す経済価値の減少を合わせた額を算出して行った。その結果、浚渫は有効な方法となりえず、排砂バイパス設置が有効な方法であり、かつ早期の設置が有利であることが分かった。

参考文献

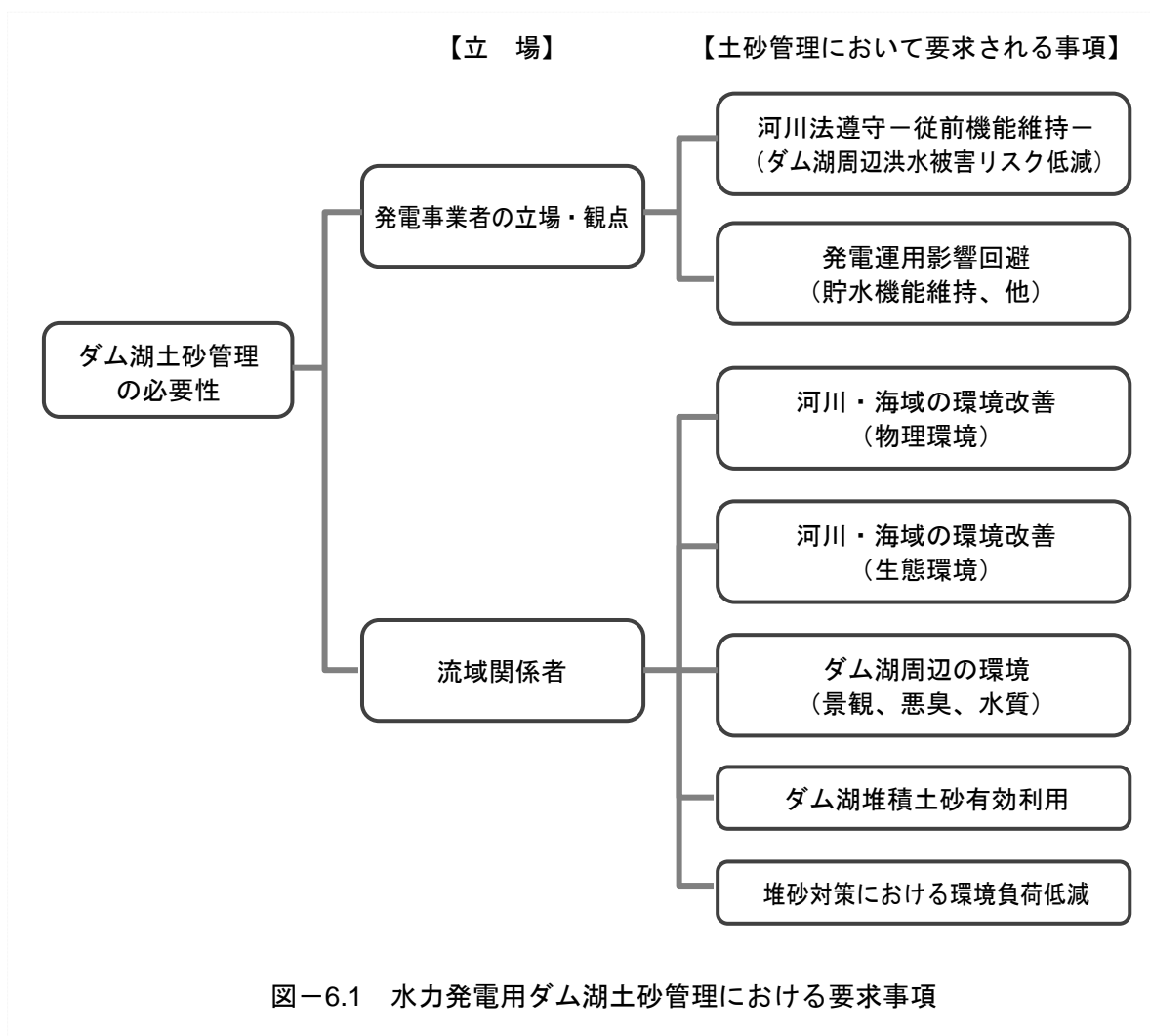
- 1) 千秋真一：発電水力演習，学献社，1967.
- 2) 岡野眞久：日本におけるダムの役割，ダムの役割を考える国際セミナー，2008.
- 3) （財）新エネルギー財団：中小水力発電ガイドブック，2012.
- 4) （社）日本大ダム会議土砂管理分科会：土砂管理分科会報告書―貯水池の土砂動態と土砂制御法―，大ダム No.212，pp12－129，2010.
- 5) 伴田勝，角哲也：土砂資源マネジメントの観点によるダム堆砂リサイクル事業の検討，河川技術論文集，第15巻，2009年6月，2009.
- 6) （財）ダム水源地環境整備センター：ダムの堆砂対策技術ノート―ダム機能向上と環境改善に向けて―，2008.

第六章 水力発電用ダム湖における総合土砂管理の推進

本章では、ダム設置者・発電事業者の観点のみからでなく、他の流域関係者らの観点も踏まえ、水力発電用ダム湖における総合土砂管理について論じる。まず、ダム湖の土砂管理に関して、社会からどのようなことが求められ、どのような方策があるかを整理する。次に、社会の要求に応える堆砂対策の実施状況、効果、評価、および課題について整理を行い、電源開発株式会社が所有・管理する水力発電用ダム湖をフィールドにしてその適用を検討する。最後に、水力発電用ダム湖における総合土砂管理の推進にあたって課題となっている主な事項を抽出し、その内容・対応策等について論じる。

6.1 水力発電用ダム湖の土砂管理において要求される事項

水力発電用ダム湖の土砂管理については、立場毎に観点が異なり、要求する事項も異なる。その体系を図－6.1、その内容を表－6.1 示す。



表－6.1 土砂管理において要求される事項の内容

立 場	要求される事項	要求される事項の内容
利水者	河川法遵守－従前機能維持－ (ダム湖周辺洪水被害リスク低減)	河川法第 44 条 (河川の従前の機能の維持) に則り、堆砂進行により大きくなったダム湖周辺の洪水被害リスクを抑制・低減する。
	発電運用影響回避 (貯水機能維持)	堆砂進行による有効貯水容量の低減にともなって発電運用に生じる影響を回避する。
流域関係者 (利水者以外)	河川・海域の環境改善 (物理環境)	ダム設置により河川の土砂連続性が遮断され、ダム下流河川の河床低下、河床材料粗粒化、海域で汀線の後退が生じている。これらの状況を改善する。
	河川・海域の環境改善 (生態環境)	ダム設置により河川の土砂連続性が遮断され、ダム下流河川および海域の生態環境が悪化している。これらの状況を改善する。
	ダム湖周辺の環境 (景観、悪臭、水質)	ダム湖において堆砂進行することによる景観悪化、悪臭発生、水質悪化を抑制する。
	ダム湖堆積土砂有効利用	ダム湖内に堆積する土砂を建設資材として有効利用する。
	堆砂対策工事環境負荷低減	堆砂対策工事により生じる、交通負荷、振動・騒音、大気汚染等を低減する。

6.2 土砂管理において要求される事項に応える堆砂対策

本節では、図－6.1 および表－6.1 に示した発電用ダム湖の堆砂対策に関して要求される事項について詳細な内容を述べ、どのような対応方法があるかについて整理する。

6.2.1 利水者にとって必要なダム湖土砂管理

河川法第 44 条 (河川の従前の機能の維持) では、「ダム (河川の流水を貯留し、又は取水するため第二十六条第一項の許可を受けて設置するダムで、基礎地盤から堤頂までの高さが十五メートル以上のものをいう。以下同じ。) で政令で定めるものを設置する者は、当該ダムの設置により河川の状態が変化し、洪水時における従前の当該河川の機能が減殺されることとなる場合においては、河川管理者の指示に従い、当該機能を維持するために必要な施設を設け、又はこれに代わるべき措置をとらなければならない。2 前項の河川管理者の指示の基準は、政令で定める。」とされている。堆砂が進行し、洪水時にダム湖周辺の社会資本を浸水させるリスクが大きくなった場合、この解釈として、河川の従前の機能、つまり洪水時の通水能力が低下したこととなり、ダム設置者は河川管理者の指示に従い、必要な堆砂対策を行わなくてはならない。

発電ダムは通常、河川管理者から水利使用の許可を受ける際に、水利使用規則が附される。その水利使用規則より、通常、表－6.2 の例に示すような貯水池およびダムの状況に関する測定の実施および年 1 回の報告が、ダム設置者に義務づけられる。

表－6.2 水利使用者が行う貯水池およびダムの状況に関する測定（水利使用規則）

測定すべき事項		測定の回数
貯水池の水位		毎日
貯水池への流入量		
注水口ごとの注入量		
使用水量		
ダムからの放流量		放流のつど
	温度	少なくとも毎四半期 1 回
	変形	
	揚圧力	
	漏水量	少なくとも毎月 2 回
貯水池内及びその末端付近の堆砂の状況		少なくとも毎年 1 回

表－6.2 の最下欄に「貯水池内及びその末端付近の堆砂の状況」とあるが、その状況調査方法は、「ダムの堆砂状況調査要領（案）」¹⁾に従う。この調査要領では、堆砂による影響調査表の作成が求められている。調査表には、不等流計算により得られる現在洪水位より標高が下の位置にある建物、公共施設等を把握して記載することが求められている。

ダムは、ダム検査規定²⁾に従い定期検査を受けなくてはならない。その頻度は、3 年に 1 回以上（規模が小さい等の理由により 5 年に 1 回以上となるダムもある）である。主たる検査内容を表－6.3 に示す。

表－6.3 ダム定期検査における主たる項目²⁾

ダム定期検査項目
ダム及びその基礎地盤の温度、変形、揚圧力、間隙水圧又は漏水量
ゲート等の開閉の状況
観測施設、通報施設及び警報施設
上流において堆砂等による河床又は水位の上昇の有無
貯水池内の河岸又はその附近の土地の崩壊又は地すべりのおそれの有無
その他のダムの管理が適正か否か

発電用ダムにおいては、ダム定期検査を受検すると検査者である河川管理者から、検査対象ダムに対する総合判定が示される。総合判定は、表－6.4 に示す通りの 3 つであり、河川管理者より A 判定が示された場合は、早急な対応を行なわなければならない。

表－6.4 ダム定期検査の総合判定 ²⁾

総合判定	判定内容
A	ダム及び当該河川の安全管理上重要な問題があり、早急な対応を必要とする。
B	一部問題はあるが、全体的な問題はないといえる。
C	全体的に問題はない。

これまでに示した通り利水者は、河川法、水利使用規則、およびダム定期検査等に基づいてダム湖の堆砂進行がダム湖周辺の社会資本への影響について確認を行い、影響がある場合は対策を講じるよう求められる。

堆砂進行による発電運用影響については第 3 章で述べたが、現状で水力発電設備の一般的課題となっておらず、著しい堆砂進行により貯水容量が減少している地点や、取水設備、放水設備が周辺の堆砂により影響を受けている地点に限定して発生している。

平成 15 年までは電気事業法に基づいて、発電利水者は経済産業省に貯水池および調整値の堆砂状況報告を行う必要があった ³⁾。平成 16 年にこの報告規則が一部改正となり、堆砂状況調査は引き続き行う必要があるものの、報告は廃止となった ⁴⁾。電気事業法では、ダム湖を発電設備として扱う傾向が強く、報告すべき対象は堆砂量や堆砂率であり、河床上昇によるダム湖周辺への影響は調査対象となっていない。また、平成 16 年の報告廃止となる前から、堆砂進行の状況によっては、報告を毎年行わなくてよいとする規定もあった。

貯水容量の減少は設備機能の低下となるが、電力土木技術協会の調査報告 ⁵⁾、(社)日本大ダム会議技術委員会による報告 ⁶⁾等に記載の通り、ダム湖堆砂進行が発電運用に大きな影響を与えていないとの判断がある。

これらの背景から、堆砂進行が影響する事項として、ダム湖周辺の浸水被害リスクを主として扱っているのが現状である。ダム湖堆砂を監視する法律は、河川法が主たるものとなっており、電気事業法の観点からダム湖を発電設備として評価する機会の一部を失っている。発電用ダム湖において、ダム設置者・電気事業者が実施する堆砂対策は、ダム湖周辺洪水被害リスク低減、取水放水設備機能保持を目的として、局所的な掘削排除を行う場合が殆どとなっている。

6.2.2 流域関係者他（利水者以外）が求めるダム湖土砂管理

近年、ダム湖の土砂管理に関して、利水者（ダム設置者）以外が環境への配慮等を要求する場合が増えている。表－6.1 で示した要求される事項に対し、どのような堆砂対策が対応策となりうるかについて、を表－6.5 に示す。

表－6.5 利水者以外がダム湖土砂管理において要求する事項と対応策となりうる堆砂対策

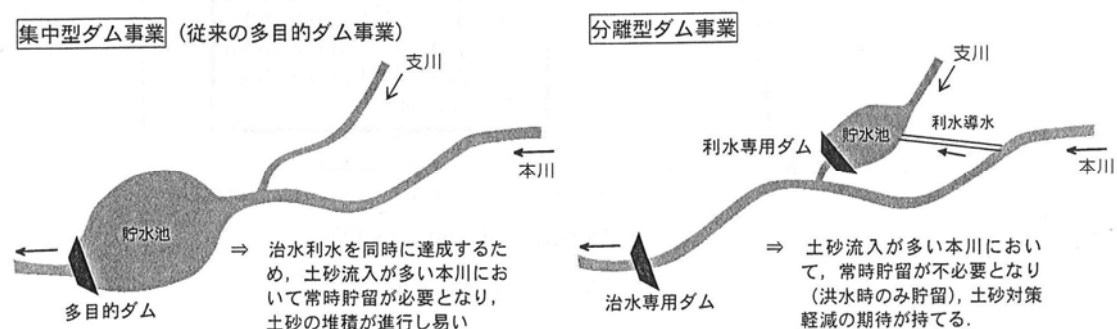
利水者以外が 要求する事項	要求事項の内容	堆砂対策					
		排砂 バイパス 設置	排砂 ゲート 設置	置土 （土砂還 元）	分離型 ダム [※]	掘削 排除	堆砂有 効利用
河川・海域の 環境改善 （物理環境）	ダム設置により河川の土砂連続性が遮断され、ダム下流河川の河床低下、河床材料粗粒化、海域で汀線の後退が生じている。これらの状況を改善する。	○	○	○	○		
河川・海域の 環境改善 （生態環境）	ダム設置により河川の土砂連続性が遮断され、ダム下流河川および海域の生態環境が悪化している。これらの状況を改善する。	○	○	○	○		
ダム湖周辺の 環境改善 （景観、悪臭、水質）	ダム湖において堆砂進行することによる景観悪化、悪臭発生、水質悪化を抑制する。	△	△	△	○		△
ダム湖堆積土砂 有効利用	ダム湖内に堆積する土砂を建設資材として有効利用する。					△	○
堆砂対策工事 環境負荷低減	堆砂対策工事により生じる、交通負荷、振動・騒音、大気汚染等を回避・抑制する。	○	○		○		

○：効果あり、△方法によっては効果あり

※治水機能と利水機能とを1つのダム貯水池に担わせず、複数のダムに分離する方法（詳細後述）

表に示す○は、要求事項に対し対応しうる堆砂対策であることを意味する。△は方法によっては、要求事項に対応できることを示す。例えば、排砂バイパスは景観を悪化させる堆砂を排除する効果がある位置に設置すれば○であるが、そうでない場合は△となる。一般的には、排砂バイパスや排砂ゲートは、流入水量や流入土砂量が多い地点に設置するものであり、堆砂によってダム湖周辺において悪臭や水質悪化等が問題となる場合は少ない。ここでは、経済性を考慮していないが、分離型ダム⁷がダム設置者以外の要求事項にもっとも多く対応しうるものである。

図－6.2 に示すとおり、通常、河川の総合開発においては、多目的ダム（集中型ダム事業）として治水機能と利水機能を 1 つのダム湖に持たせるが、治水・利水分離型ダム（事業）⁷⁾では、本川に治水ダム、支川に利水ダムを設置する。この場合の本川に設置する治水ダムは、貯水しない流水型ダムとする。新規にダム事業を行う場合は経済性もあり、周辺環境への負荷も小さくでき、今後に新規に開発する場合は、有効な方法である。既設の発電用ダム貯水池に適用するには、ダムの大幅な改造工事と新設を行うこととなるため、その実現は容易ではない。



図－6.2 集中型ダム事業（左）と治水・利水分離型ダム事業（右）⁷⁾

排砂バイパス設置と排砂ゲート設置による堆砂対策は、利水者以外の要求事項の多くに応えることができる。例えば、表－6.6 に示す関西電力が S 川水系旭川の旭ダムに設置した排砂バイパスはダム下流の土砂環境を大きく改善した⁸⁾。旭ダム貯水池は、揚水式発電所の下池であり、貯水する必要性が殆どないため排砂バイパスを適用することができた。本来の目的とも位置付けられる濁水長期化軽減対策としても有効に機能している。

表－6.6 旭ダム排砂バイパス諸元⁸⁾

項 目	内 容
旭ダム（奈良県十津川村）	1978 年、出力 1,206MW 準揚水式発電所下池
排砂バイパス竣工	1998 年
〃 形状	幌型（D-shape）
〃 断面サイズ	幅 3.8m×高さ 3.8m
〃 延長	2,350m
〃 勾配	2.9%（一般部）
〃 設計流量・流速	140m ³ /sec・11.4m/sec

排砂ゲートについては、黒部川水系に設置されている関西電力の出し平ダムと国土交通省の宇奈月ダムとが行っている連携排砂による事例がある⁹⁾。出し平ダム・宇奈月ダムの排砂に関わる事項について表－6.7に示す。ダム計画時に設置された排砂ゲートであるが、その運用は試行錯誤を繰り返しながら改善を続けてきている。ダム下流河川の環境については、排砂ゲートの効果を確認するために様々なモニタリングが行われている。モニタリングは、水質調査、底質調査、水生生物調査、測量、ダム地点での監視等が行われている。流域関係者や学識経験者により構成される評価委員会や土砂管理協議会が設置され、多くの観点や立場から排砂ゲート運用の評価・改善が図られている。

平成3年12月の出し平ダム初回排砂では、ダム完成後約10年を経過した堆積土砂を、冬季の小流量時に一度に流出させたために、ダム下流河川・海域に水質障害などの予想を超える影響を与え、問題となった。しかしながら、その後、委員会・協議会等による評価・検討に基づいて改善を繰り返し、近年では、融雪と梅雨が重なる6月～7月の時期に流水による希釈効果を期待しながらゲート排砂を行うことにより、一時的な環境変化はあるものの、大きな影響はない、と評価されている。

表－6.7 出し平ダム・宇奈月ダムのゲート排砂に係る事項⁹⁾

項 目	内 容
出し平ダム・貯水池	関西電力、昭和60年竣工、総貯水容量 9,010 千 m ³
宇奈月ダム・貯水池	国土交通省、平成6年竣工、総貯水容量 24,700 千 m ³
出し平ダムゲート排砂	平成3年12月が初回
連携排砂	平成13年から実施

排砂バイパスは、建設中も含めて国内で5例（布引五本松ダム、旭ダム、美和ダム、小渋ダム、松川ダム）であり、排砂ゲートについては大規模なものでは前述した黒部川での1例しかない。このため、現状では掘削排除が堆砂対策の中心となっており、その中では、置土によるダム下流土砂還元が、最も利水者以外の要求事項に対応しうるものである。

置土によるダム下流土砂還元については、水工学委員会環境水利部会が平成20年に置き土シンポジウムを実施し、現在実施されている土砂還元の効果・影響について整理・分析を行った¹⁰⁾。そのまとめとして、水系一貫の土砂管理、流入土砂量に対する土砂還元量の割合を現状の最大10%程度から30%～50%へ高めること、土砂還元と有効利用のベストミックスの達成、等が必要であると結論している。置土は、比較的容易に管理ができる形で川に土砂を還元できる優れた方法であるが、ダム管理者にとっては、取扱量が多くできず、堆砂対策としては十分なものとはなり難い。

堆砂の有効利用については、費用の面で有利でないこと、需要の影響を受けること、法

的制約がある場合が多いこと、の主たる 3 つの理由から一部の地点を除いてあまり進んでいない。置土の段落で述べた通り、ダムが設置された河川の流況は、設置前よりもピーク流量が小さくなる。そのため、ダム設置前程度の土砂移動を期待することはできず、ダムに堆積する土砂の 30%~50%が最大置土量の目安と考えられる。残りの 50%~70%の堆積土砂は、その質にもよるが、有効利用することが可能である。また、日本国内の年間土砂生産量は約 200 百万 m³であり、そのうち 45 百万 m³がダム湖に堆積する。一方、天然砂の年間採取量は 82 百万 m³であり、ダム湖堆砂はこれらの需要をフォローするうえで量的にはそれなりにある。一時は、中国からの輸入砂に頼っていたが、中国内の開発に伴って中国内の砂需要が増加したため、輸出が規制された。

砂利の需要は景気に左右されるため、恒常的に実施が必要な堆砂排除と砂利需給とのバランスが取れなくなる場合がある。また、非出水期に堆砂排除を行う場合が多いが、プラントの仮置きヤードには制約があり、出水期に大きな需要が生じた場合に対応することができなくなる。1960 年代に河川砂利の乱採取があり、多くの河川で砂利採取が制約されている。河川での砂利採取は、砂利採取法と河川法の双方の許可が必要であるが、これらに加えて河川や海岸を保護するための砂利採取規制計画や特別措置法が施行されている場合があり、ダム湖堆砂の掘削排除の妥当性を示す必要がある。これらの法制約は、河川部とダム湖内とを同様に扱っており、河川の必要な砂利とダム湖内の有害な砂利とが同じ扱いとなっている。

このような状況への対応策として、伴田・角は土砂資源マネジメントの観点から、図-6.3 に示す堆砂リサイクル事業のフレームを構築した¹¹⁾。フレームでは、堆砂リサイクル業者をダム管理者と骨材利用者との間に設け、需給の調整を行うこととしている。堆砂リサ

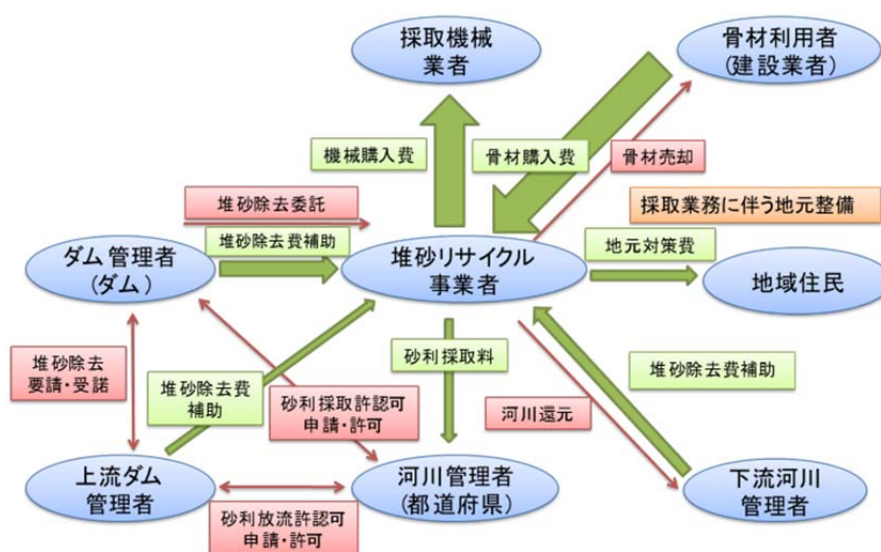


図-6.3 伴田・角によるダム堆砂リサイクル事業のフレーム¹¹⁾

イクル業者は、ある範囲に存在する複数のダム湖からの堆砂を受け入れることにより、スケールメリットを発揮させることができるとしている。また、堆砂リサイクル業者は、場合によっては堆砂対策費用として、ダム管理者から一部費用負担を求めることができるとしている。法的な面の調整については、ダム下流土砂還元と合わせた、総合的なダム湖土砂管理方策を河川管理者と流域関係者に丁寧に説明し、理解を求めていくこととしている。

掘削排除については、多くの地点で実施されている方法であるが、ダム設置者以外の要求事項に多く応えられない。それでも多くの地点で実施されているのは、緊急的に貯水池内の有害な堆積土砂を排除せざるをえないからであると考えられる。確実に一定の効果が得られる掘削排除は、結果として継続的に行われていく場合が多い。特に貯水池末端での堆砂進行が浸水被害リスクを大きくしている水力発電用ダム湖において、その傾向が見られる。

掘削排除については、緊急的な効果は得られるものの、費用や周辺への環境負荷の面、また掘削可能数量の面でも持続性を有しているとは言い難い。長期的な視点に立った対策立案実施が必要である。

6.2.3 まとめ

ダム湖土砂管理においては、利水者の要求する事項と流域関係者の要求する事項とがあり、両方を満たす方法が存在しているものの、主として前者を満たす方法が実施されているのが現状である。また、その前者を満たす方法の主たるものは掘削排除となっており、掘削可能数量、費用の面で必ずしも持続性を有しているとはいえない。また、ダム下流河川環境等の流域関係者への配慮が堆砂対策の目標とはなり難く、今後、どのような土砂管理を行っていくかを検討・計画する体制構築が重要となる。

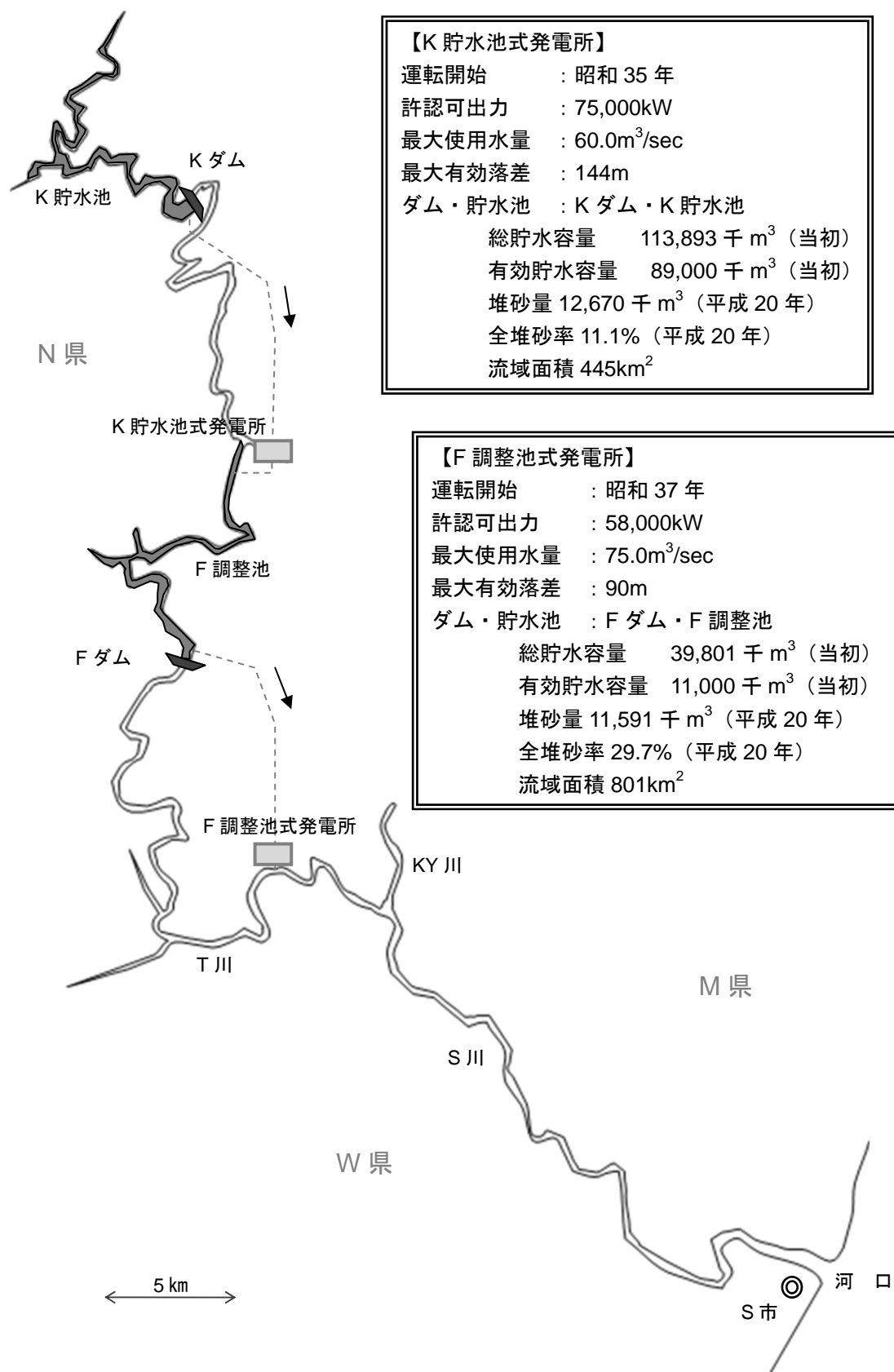
著者が第4章、第5章で述べた、発電用ダム貯水池および調整池の堆砂対策では、掘削排除ではなく、流水の力を利用して土砂をダム下流へ移動させることを主としている。次節では、紀伊半島S川、高知県N川において、現状行われている対策と著者が提案する対策とを比較・分析することにより、水力発電設備の持続的使用および総合土砂管理について検討したい。

6.3 S 川（T 川）の水力発電用ダム湖における堆砂対策実施状況と課題

紀伊半島 S 川の上流、T 川に電源開発株式会社は 2 つの水力発電所を設置している。上流側に K ダム貯水池（K 貯水池式発電所）、F 調整池（F 調整池式発電所）である。K 貯水池の堆砂率は 11.1%（平成 20 年）、F 調整池の堆砂率は 29.7%（平成 20 年）であり、現在、出水時の浸水被害リスクを低減させるため掘削排除による堆砂対策を実施している。この実施中の堆砂対策について評価を行い、持続的に発電設備を使用していくうえでの長期的堆砂対策について論じる。

6.3.1 S 川（T 川）の水力発電設備およびダム湖堆砂状況

S 川の流域面積は 2,360km²であり、その中に年降水量 4,000mm を越す多雨地帯である大台ヶ原を含む。位置は中央構造線の南側、西南日本外帯であり、新生代第四期の活発な隆起作用を受けて穿入蛇行を発達させ、その流域は急峻である。地形的には中・上流域では左岸や泥岩を主体とする白亜紀から古第三紀の地層からなっており、中・下流域では新第三紀の地層からなっている。図－6.4 に T 川から S 川河口までとダム等の発電設備の位置および諸元を示す。

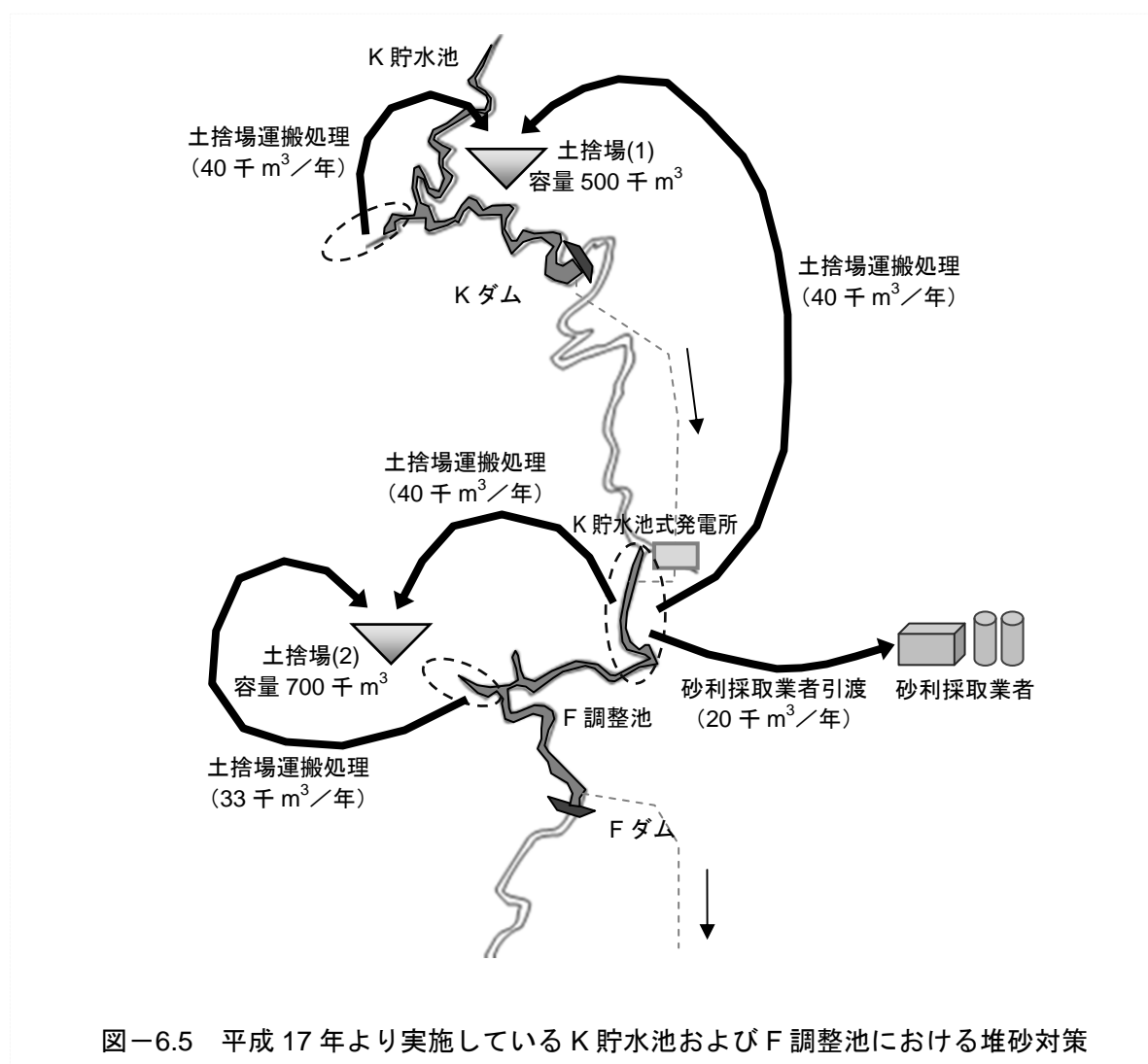


図－6.4 S 川（T 川）K 貯水池式発電所・F 調整池式発電所の位置および諸元

T 川流域においては、明治 22 年（1889 年）に豪雨に伴う洪水や山腹崩壊・土石流によって歴史上まれにみる大水害が発生した¹²⁾。1 ヘクタール以上の崩れが 247 ヶ所で、河道閉塞は 53 ヶ所で発生したとされている。このため T 川の河床は平均で 30m、場所によっては 50m 上昇した。このように河道に大量の土砂が堆積しているため、大水害から約 70 年を経て設置された K 貯水池（1960 年設置）、F 調整池（1962 年設置）であるが、毎年に入流・堆積する土砂量は多く、年平均堆砂量は K 貯水池で 247 千 m³/年、F 調整池で 259 千 m³/年である。

6.3.2 S 川（T 川）の水力発電用ダム湖堆砂対策の現状

K 貯水池および F 調整池ともに、計画堆砂量および計画堆砂位を超えて堆砂が進行しており、計画洪水量が生じた場合の浸水被害リスクが顕在化している。このため、平成 17 年よりダム湖末端付近等で堆砂排除を実施してきている。堆砂排除の内容を図－6.5 に示す。



図－6.5 平成 17 年より実施している K 貯水池および F 調整池における堆砂対策

K 貯水池と F 調整池とで毎年合計 173 千 m^3 の堆砂を掘削排除し、うち 20 千 m^3 程度を砂利業者に引き渡し、残りの 153 千 m^3 は全て土捨場へ運搬処理している。土捨場の容量は、2 か所を合計して 1,200 千 m^3 程度あるものの、その土捨場寿命(土捨場容量／毎年土捨量)は 8 年しかない。

現行堆砂対策は、ダム湖周辺の浸水被害リスクを抑制する効果はあるものの、土捨場確保や大規模な出水が生じた場合の対応等を考えると、持続性があるとはいえない。以下に現行堆砂対策の課題を挙げる。

- 1) 流入・堆積土砂量の大部分を排除できない。
- 2) 毎年の費用が膨大であり、かつ期限なく継続的に費用を必要とする。
- 3) 山間部での土捨場確保が困難である。
- 4) ダム下流河川環境が改善できない。
- 5) 大規模出水が生じた場合に対応できない。
- 6) 堆砂の有効利用がダム湖周辺でしか実現しない。

1)については、K 貯水池と F 調整池とで合計で平均年間 500 千 m^3 の流入堆積土砂量があるが、そのうち 40%程度しか排除できていないことを指摘するものである。緊急的にある区間の出水時の水位を低下させることは可能であるが、長期的には別の場所の出水時水位が上昇し浸水被害リスクが大きくなることとなる。また、有効貯水容量も確実に減少することから、水力発電設備の長期的使用の実現に影響がでることとなる。

2)については、K 貯水池と F 調整とで合計で年間数億円程度の堆砂対策費用を継続的に必要とすることを指摘するものである。発電機等の機械メンテナンスを除くと、その割合は他の設備の維持管理に関わる費用と比較にならないほど大きい。また、この費用は期限が無く、ダムが設置されている限り必要となる費用である。

3)については、1,200 千 m^3 の土捨場が 8 年で満杯となるが、次の土捨場を確保しなくてはならないことを指摘するものである。山間部に土捨てできる場所を見つけ、その場所を利用するために取得することは容易ではない。1,200 千 m^3 のうち、700 千 m^3 は T 川村の捷水路事業(蛇行河川をショートカットして、河川の一部を廃川し、埋土して平坦な土地をえる事業)に協力する形で得たものであり、このような形での土捨場取得は恒常的に期待できるものではない。残りの 500 千 m^3 については、貯水池内に土捨場を設けたものであり、ダム設置者の保有する土地への土捨てである。土捨場取得に向けた調査、土地所有者との交渉は行ってきたが、結果として一般の土地を確保して土捨場としたケースはなく、不可能に近い

4)については、Fダム下流5km区間の河川においては、図-6.6に示す通り河床低下が生じており、掘削排除後の堆砂をダム下流河川へ還元しない限り、河川環境を改善できないことを指摘するものである。また、このような区間では通常、河床低下時に生じた河床材料の選択的流出により、河床材料の粗粒化が生じている。これらの要因は、ダムが河川土砂の連続性を遮断していることである。堆砂対策として、土捨て場運搬および堆砂有効利用を採用する場合、ダム下流河川環境を改善するための土砂還元がなされず、図のような河床低下が継続・進行することとなる。

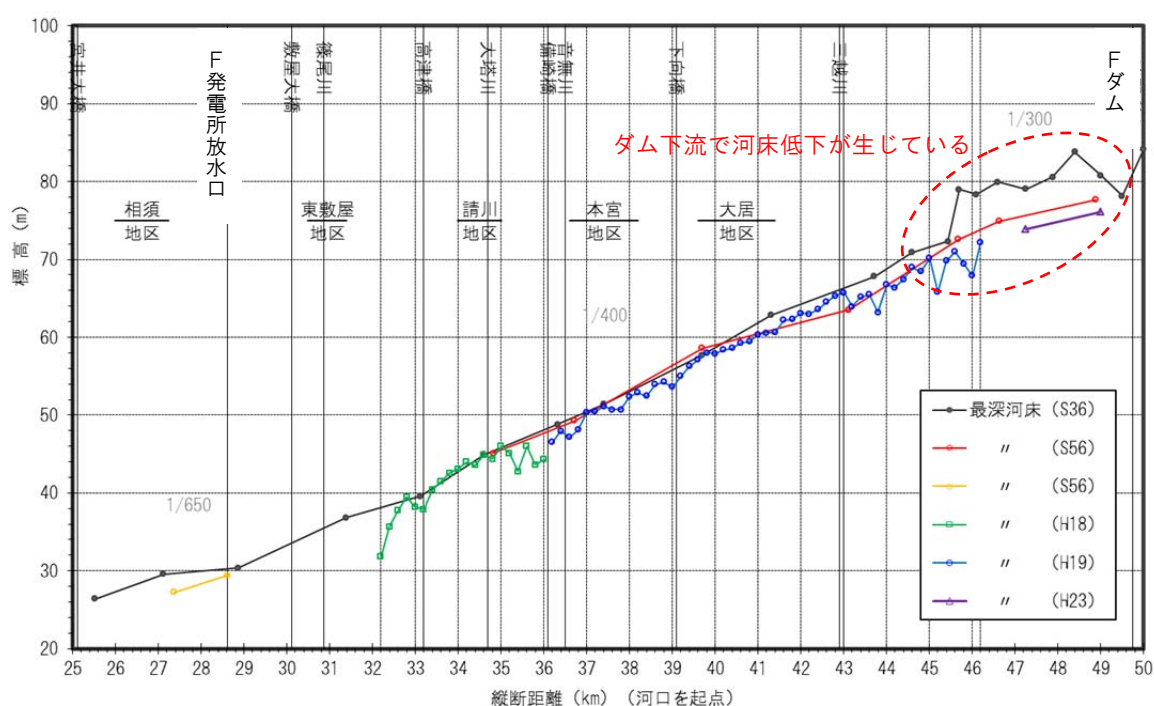


図-6.6 Fダム下流河床位経年変化

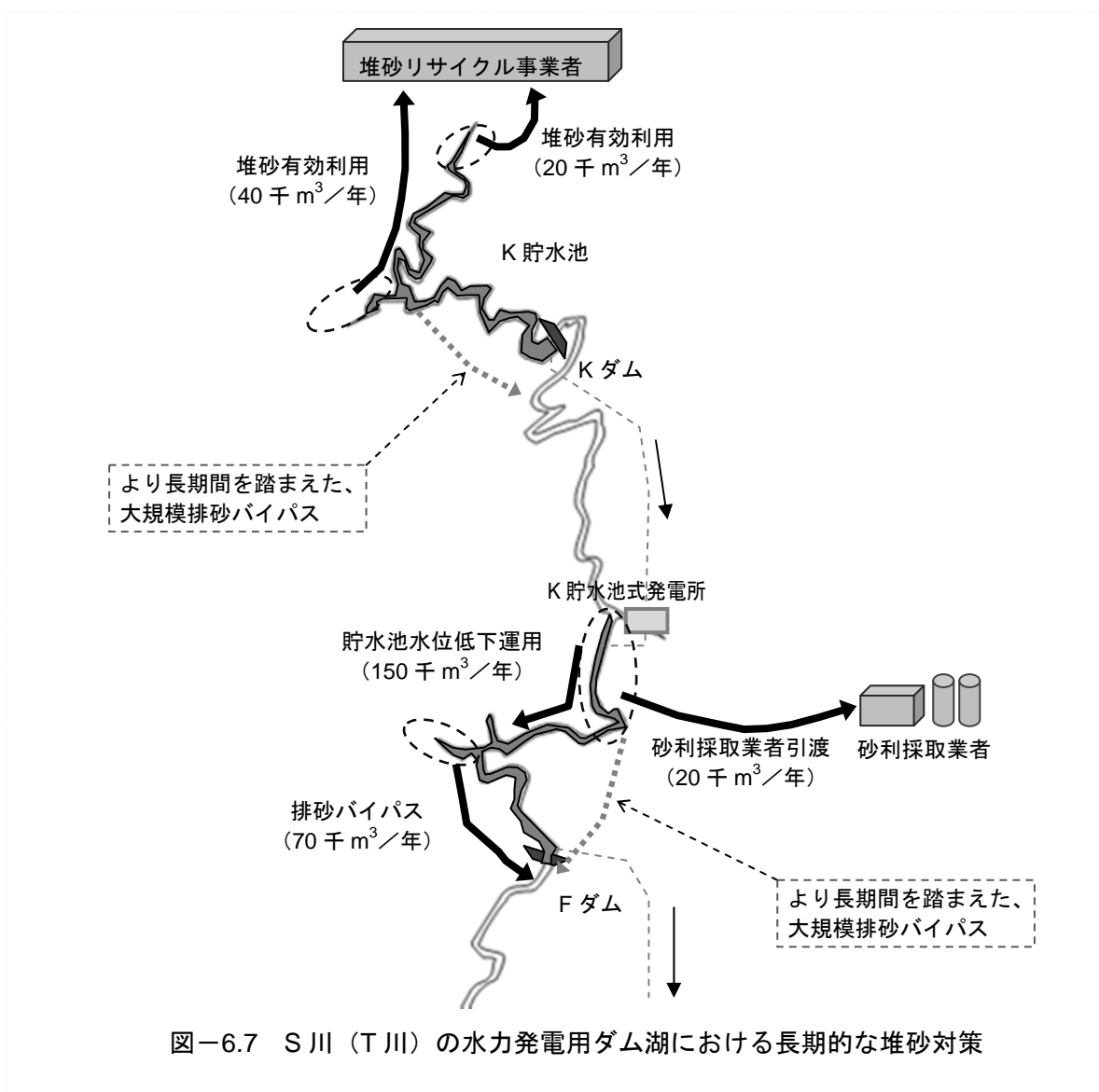
5)については、毎年堆砂排除を実施して目標とする河床位・出水時水位程度に接近・到達しても、いったん大きな出水が生じれば、掘削により河床低下させた場所に流入土砂が堆積し、元の状態に戻ることを指摘するものである。また、大きな出水の後には、崩壊等により生産され、河道に堆積した土砂がダム湖流入土砂量の増加を生じさせることから、掘削排除で対応しきれなくなる可能性がある。

6)については、砂利が地産地消型の資材であるため、運搬コストを原価に取り入れることができず、ダム湖周辺での消費のみとなってしまうことを指摘するものである。都市部までは数十kmの距離があり、運搬費用が2,000円～3,000円/m³となってしまう、ダム堆砂を山間部から都市部へ運搬して商品化することは現状では困難である。よって、堆砂の

有効利用は、ダム湖周辺の小さな需要に対してのみ行われているのが現状である。

6.3.3 S 川（T 川）の水力発電用ダム湖における長期的な堆砂対策

前節で示した課題、第 3 章および第 4 章での成果を基に、長期的に有効な堆砂対策を図－6.7 に示す。



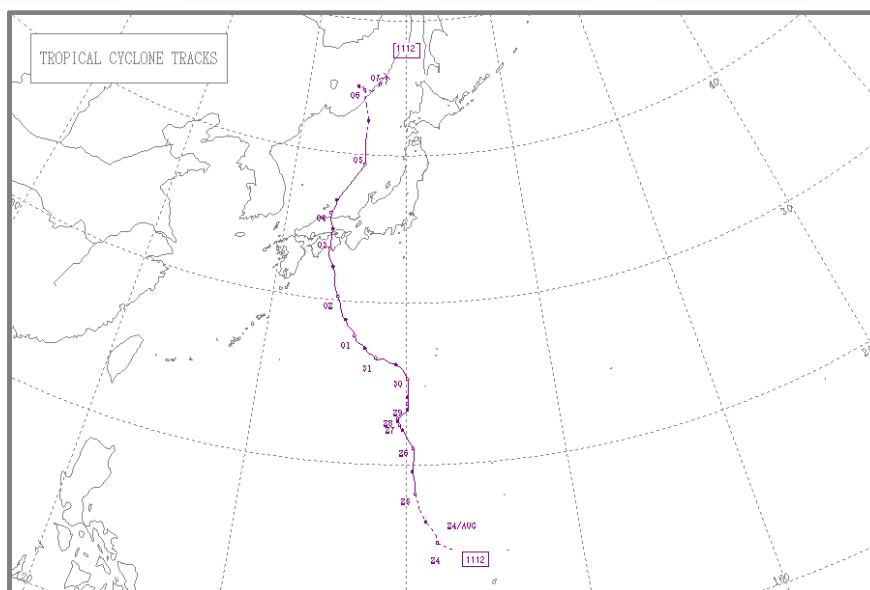
図－6.7 S 川（T 川）の水力発電用ダム湖における長期的な堆砂対策

6.3.2 で示した K 貯水池および F 調整池における堆砂対策が有する 6 つ課題のうち、4 つには応える対策である。2) の毎年の費用については、掘削排除を全て有効利用することにより対応し、合わせて 6) についても、堆砂リサイクル事業者を設置することにより従来よりも遠方の需要者への提供を達成する。3) については土捨場を利用しない方法とし、4) については、F 調整池の排砂バイパス運用により対応する。これらにより、数十年から 100 年程度の中長期の堆砂対策としては、利水者と流域関係者の要求に応えうるものである。

しかしながら、1) の流入土砂の大部分を堆積させること、5) の大規模な出水への対応については、100 年を超える長期間の水力発電設備の持続的使用を考える場合必要であり、それらへは対応できていない。図－6.7 に点線で示したが、大規模な排砂バイパスがその対応策となりうる。現時点における最大の排砂バイパスの設計流量は 300m³/sec 程度である。K 貯水池や F 調整池の本流に設置する場合、排砂バイパスの設計流量を 1,000m³/sec 程度とするか、300m³/sec 程度の設計流量であるが、呑口部の工夫により流砂の大半を捕捉できるものとしなければならない。また、経済性も確保する必要がある。これらについては、今後の技術的な課題である。

6.3.4 平成 23 年台風 12 号による S 川（T 川）に存在するダム湖の堆砂対策への影響

平成 23 年 8 月末から 9 月初めにかけて台風 12 号が紀伊半島付近を通過した。このため、紀伊半島全域で大きな洪水被害が発生した。台風の進路¹³⁾、被害の概要¹⁴⁾を図－6.8 および表－6.8 に示す。



図－6.8 平成 23 年台風 12 号進路¹³⁾

表－6.8 平成 23 年台風 12 号による洪水被害の概要¹⁴⁾

項 目	内 容	備 考
死者・行方不明者	死者 78 名・行方不明者 16 名	
全壊・半壊	全壊 371 棟・半壊 2907 棟	
床上浸水・床下浸水	床上浸水 5,657 棟・床下浸水 19,152 棟	

平成 23 年は、K 貯水池で約 3,000 千 m³、F 調整池で約 1,000 千 m³ の堆砂進行が生じた。このうちの多くが、台風 12 号による降雨・出水時に流入・堆積した土砂であると考えられる。ダム湖に流入はしていないものの、山腹の崩壊により河道や河道周辺にも大量の土砂堆積が生じており、今後、出水のたびにこれらの土砂が移動して 2 つのダム湖に流入してくることとなる。

同じ S 川 (T 川) 設置されている関西電力株式会社の旭ダム貯水池には排砂バイパスが設置されており、シミュレーションによると河川上流から供給される土砂の 75% が貯水池に流入せず、排砂バイパスを通じてダム下流河川へバイパスされたと報告されている¹⁵⁾。旭ダム貯水池の台風 12 号による堆砂量は約 200 千 m³ であり、試算すると約 600 千 m³ の堆砂進行を回避できたこととなる。さらに、旭ダム貯水池の排砂バイパスについて、長期間の試算をすると、1998 年の設置以来現在まで約 1,200 千 m³ の堆砂進行を回避してきたこととなる。排砂バイパスの設置費用と 1998 年から 2012 年までの間のメンテナンス費用等から、m³ あたりの単価を試算すると表-6.9 の通りである。

表-6.9 旭ダム排砂バイパスの堆砂対策単価の試算

項 目	内 容	備 考
排砂バイパス設置費	13,200,000 千円／式	ダムの堆砂対策技術ノート ¹⁶⁾
排砂バイパス維持管理費	121,000 千円／年	ダムの堆砂対策技術ノート ¹⁶⁾
1998 年～2012 年の総費用	15,015,000 千円	15 年間
1998 年～2012 年の平均単価	12,512 円／m ³	1,200 千 m ³
(試算) 1998 年～2057 年の平均単価	4,263 円／m ³	60 年間、20,460 百万円、4,800 千 m ³

1998 年から 2012 年の間の堆砂対策の平均単価を算出すると、12,512 円／m³ であるが、今後、同じ流況が継続すると仮定して 60 年間の平均単価を算出すると、4,263 円／m³ である。排砂バイパスは設置費用が高くなるものの、長期に運用することで掘削排除と同程度（単価数千円）、あるいは、より経済的な堆砂対策単価とすることができる。また、ダム下流に本格的に土砂が供給され、先述のようにダム下流の河川環境に対する改善効果を期待することができる。事実、平成 23 年台風 12 号を経た旭ダム下流河川の河床環境は、適当な土砂供給・移動が行われたことにより、生物相に富む極めて良好な環境が維持されている。

なお、旭ダムの場合は、排砂バイパス設置の主目的は貯水池による濁水長期化を軽減することである。洪水時の高濁度水の直接放流、洪水後の清水バイパスによる低濁度水の放流、の両者の運用により、ダム下流の水質は大きく改善しており、これらは排砂バイパスの重要な効果として見込むことができる。

掘削排除による堆砂対策を実施している、同じT川流域のK貯水池の平成23年台風12号による堆砂状況の変化を図-6.9に示す。平成17年から開始した堆砂排除の効果もあり、ここ数年間は堆砂量の増加は抑制されていたものの、台風12号による土砂流入で約3,000千 m^3 の土砂流入があり、堆砂量は大きく増加した。また、貯水池上流域の河道には斜面崩壊等により土砂供給がなされ、大量の土砂が堆積している。これらの土砂は、今後、出水のたびにK貯水池に流入することが予想され、本格的な堆砂対策の実施は避けられない状況である。

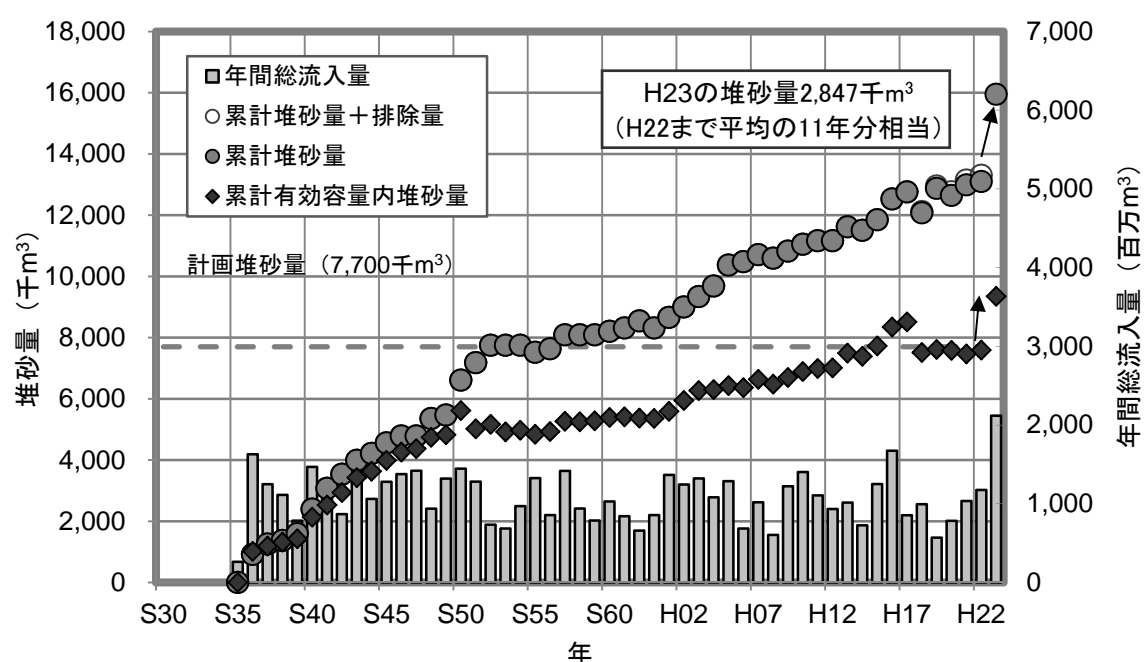


図-6.9 平成23年台風12号によるK貯水池の堆砂状況の変化

6.3.5 まとめ

発電用ダム湖の堆砂対策は、特に土砂生産が活発な流域を有し、台風等による峻烈な降雨の可能性が高い地域に存在する地点については、流水の力により流入・堆積土砂をダム下流へと移動させる、排砂バイパスや排砂ゲート等の設備対応が有利である。また、その設備対応する時期は、堆砂が進行し対策の必要性が明確になった時期ではなく、可能な限り早くした方が、有効貯水容量を温存することができ、より有利となる。

6.4 N 川の水力発電用ダム湖における堆砂対策実施状況と課題

四国南部を流れる N 川に電源開発株式会社は 3 つの水力発電所を設置している。ダム湖としては、最上流に Y ダム貯水池、N ダム調整池、H ダム調整池がある。このうち H ダム調整池は、堆砂率が 40%を超えており、調整池周辺道路等の浸水被害リスク低減を目的とした堆砂対策を計画中である。計画している堆砂対策について評価を行い、持続的に発電設備を使用していくための長期的堆砂対策について論じる。

6.4.1 N 川の水力発電設備およびダム湖堆砂状況

N 川は四国南部を流れており、年降水量 3,000mm 程度の多雨地域を流域としている。全長は 60km 程度であり標高 1,423m の勘吉森を源とし、平均勾配が 1/200 を超える急勾配河川である。流域は中央構造線を含んでおり、土砂生産が活発な地域である。その地質は、上流域と下流域で異なっており、上流域は三波川変成帯を含む。年平均堆砂量は、Y 貯水池 212 千 m³/年、N 調整池 35 千 m³/年、H 調整池 13 千 m³/年である。

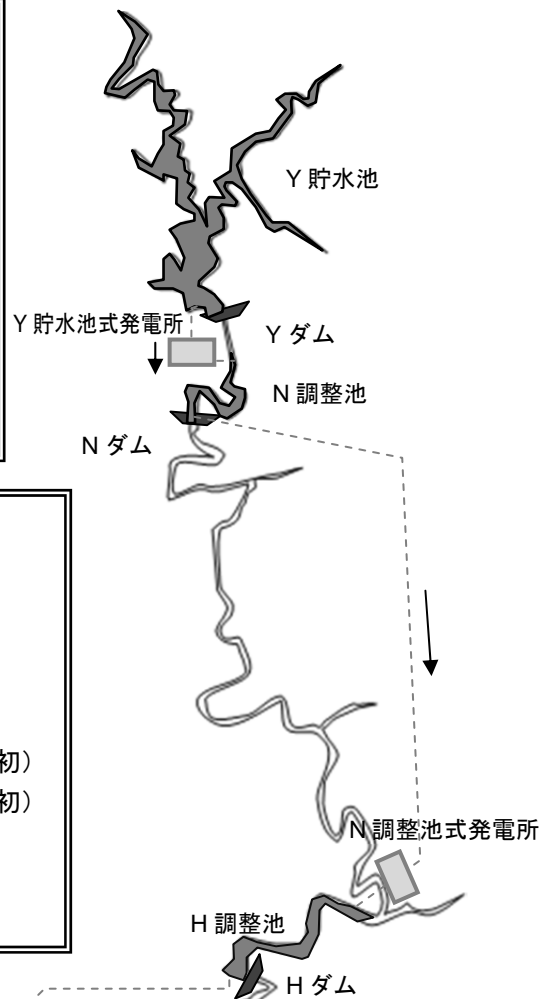
図-6.10 に最上流の Y ダム貯水池から河口までとダム等の発電設備の位置および諸元を示す。

【Y 貯水池式発電所】

運転開始 : 昭和 45 年
 許認可出力 : 36,000kW
 最大使用水量 : 50.0m³/sec
 最大有効落差 : 85.1m
 ダム・貯水池 : Y ダム・Y 貯水池
 総貯水容量 104,625 千 m³ (当初)
 有効貯水容量 72,500 千 m³ (当初)
 堆砂量 8,250 千 m³ (平成 20 年)
 全堆砂率 7.9% (平成 20 年)
 流域面積 101km²

【N 調整池式発電所】

運転開始 : 昭和 38 年
 許認可出力 : 72,100kW
 最大使用水量 : 45.0m³/sec
 最大有効落差 : 189m
 ダム・貯水池 : N ダム・N 調整池
 総貯水容量 2,940 千 m³ (当初)
 有効貯水容量 1,340 千 m³ (当初)
 堆砂量 578 千 m³ (平成 20 年)
 全堆砂率 19.7% (平成 20 年)
 流域面積 147km²



5 km



【H 調整池式発電所】

運転開始 : 昭和 35 年
 許認可出力 : 37,000kW
 最大使用水量 : 40.0m³/sec
 最大有効落差 : 108m
 ダム・貯水池 : H ダム・H 調整池
 総貯水容量 4,240 千 m³ (当初)
 有効貯水容量 980 千 m³ (当初)
 堆砂量 1,717 千 m³ (平成 20 年)
 全堆砂率 40.5% (平成 20 年)
 流域面積 217km²

図-6.10 N 川の Y 発電所・N 発電所・H 発電所の位置および諸元

6.4.2 N 川の水力発電ダム湖堆砂対策の現状

全堆砂率が 40%程度となっている H 調整池は、調整池周辺道路の浸水被害リスクが高まっているため、堆砂対策が必要な状況となっている。Y 貯水池や N 調整池においては、周辺に社会資本が少ないことや、堆砂率が比較的大きくないことから、堆砂対策は現時点で実施していない。

H 調整池の堆砂対策は図-6.11 に示す通り、出水時水位の上昇を抑制するため調整池中流域の堆積土砂をダム堤体付近の死水域に運搬して捨土すること、調整池中流域への土砂堆積を抑制するため上流域の堆砂排除を行うこと、の 2 つにより行う計画である。

N 川は勾配が大きく、土砂移動が活発な河川である。そのため、ダム設置後、ダム下流においては、河床低下および河床材料の粗粒化が河口近くまでの広範囲にまで及んでいる。平成 22 年度からは、これらの河川環境の悪化を抑制するため、H ダム下流への置土の試行が開始され、平成 22 年度に 500m³の置土が行われた。平成 23 年度は大きな出水があったため、置土は実施されていない。

また、高知県は鮎の産地として有名であり、N 川もかつてはその 1 つであった。天然アユの量を増やすため、平成 17 年度から鮎の産卵床の造成を実施している。河川上流からの土砂供給がダム設置により減じたため、鮎の産卵に適した河床が自然にできなくなっており、産卵床造成のために粒度調整した土砂を河川に供給している。H ダム下流で開始した、置土の効果が河口近くまで到達すれば、鮎産卵床造成の必要性は小さくなるが、それまでの期間は緊急的措置として行っていく必要がある。

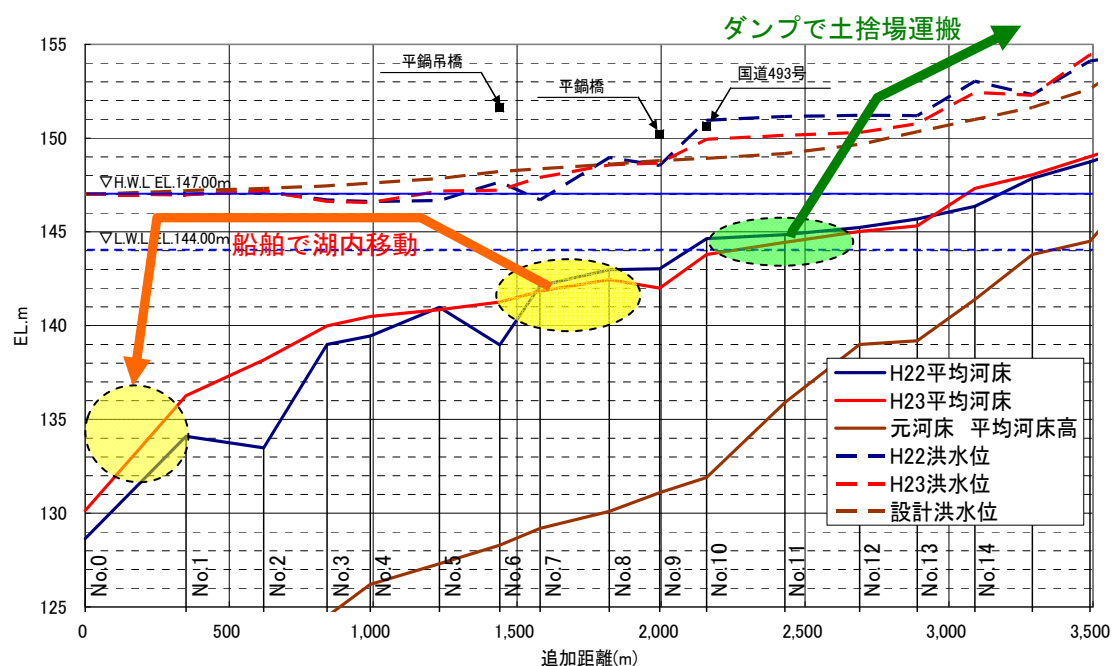
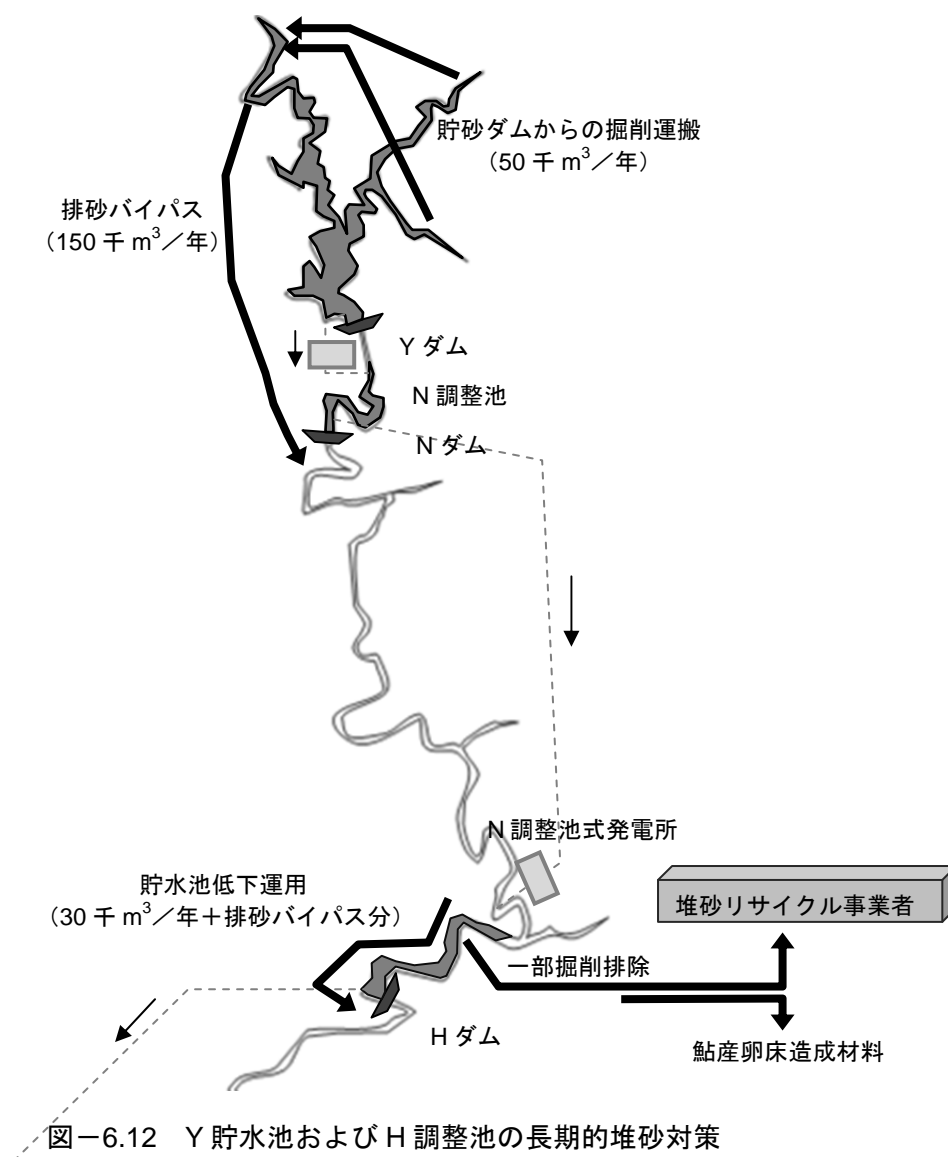


図-6.11 H 調整池の堆砂対策（計画）

6.4.3 N 川の水力発電用ダム湖における長期的な堆砂対策

H 調整池においては、出水時の調整池周辺社会資本への影響を軽減するための堆砂対策が必要である。Y 貯水池については、堆砂進行にともなう貯水機能低下による発電運用への影響を回避するための堆砂対策が必要である。後者については、年間の流入土砂量が 212 千 m^3 /年と大きいことから、掘削排除は現実的でないとする。貯水池上流端からダムまでの距離は数 km、流域は 100 km^2 と小さいことから、排砂バイパスが有効と考えられる。貯水池上流は複数に分岐していることから、最も土砂流入の大きいところへ排砂バイパスを設置し、他の地点には貯砂ダムを設置する。貯砂した土砂は排砂バイパス流入口付近まで運搬し、出水時に流水の力でバイパスを経てダム下流へ運ばれるようにする。Y 貯水池下流には、運用等の面でほぼ一体となっている N 発電所 N 調整池があるが、排砂バイパス放水口はその下流へ設ける。長期的堆砂対策について図-6.12 に示す。



6.4.4 平成 23 年 7 月深層崩壊に伴う調整池土砂流入

平成 23 年 7 月の出水時に H ダム上流約 700m の右岸部で大きな深層崩壊が生じた¹⁷⁾。崩壊土砂量は推定で 320 千 m^3 とされている。深層崩壊により生じた土石流は、H 調整池に流れ込み段波を発生させた。段波は調整池の上流下流の両方向へ伝わり、上流側では吊り橋を破壊し、下流側ではダム越流を生じさせ、ゲート操作用巻上機等の機械を機能不全にした。

H ダムは越流後、洪水吐ゲートを平成 23 年 9 月中旬まで開放したため、ダム水位が低い状態で、台風 12 号を含むいくつかの出水を経験した。このため、図-6.13 に示すとおり、中流域の土砂はダム堤体周辺の下流域へ移動し、結果、中流域の出水時の浸水被害リスクは小さくなった。

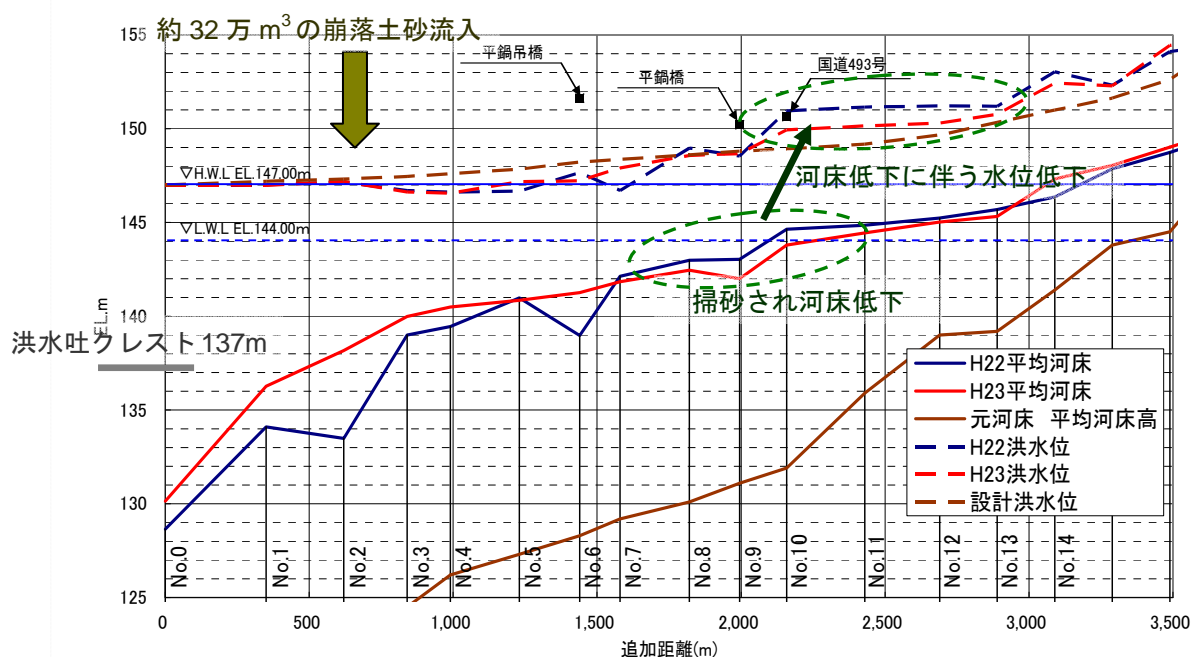


図-6.13 平成 23 年 7 月の出水・土石流流入前後の H 調整池の河床位
(平成 22 年河床と平成 23 年河床の比較)

第 4 章 4.6.2 では、洪水吐の改造による堆砂対策効果について論じた。ダム水位低下運用の効果については、上述のとおり、浸水被害リスクが低減したことから確認できた。ここでは、洪水吐の改造の効果について試算を行う。

H ダム調整池の洪水吐高率は 26.3%であり、河床変動数値解析結果から得られる、平均的な土砂捕捉率は、ダム水位低下運用する場合 43%、しない場合 60%である。平成 23 年に H ダムは、洪水吐ゲートをほぼ出水期の間開放していたことから、ダム水位低下運用を

行ったとみなせる。平成 23 年の堆砂量増分が 320 千 m^3 であることから、流入土砂量は、744 千 m^3 と推定する。洪水吐ゲート開放がなかった場合は、その 60% の 446 千 m^3 が堆砂したこととなる。よって、 $446 \text{ 千 } \text{m}^3 - 320 \text{ 千 } \text{m}^3 = 126 \text{ 千 } \text{m}^3$ の堆砂を軽減できたこととなる。4.6.2 で示した通り、改造により洪水吐クレストを 5.5m 下げた場合を仮定すると、土砂捕捉率はほぼ 0% となり完全なスルーシング排砂が達成されることとなる。掘削排除単価を 2,500 千円/ m^3 ¹⁶⁾ として、平成 23 年のみの堆砂対策効果を経済評価すると表-6.10 の通りである。ここでは、全ての堆砂を陸上掘削できると仮定した。

主として斜面崩壊により生じた土砂流入であるため、どの程度の確率年の現象であるかの評価は難しい。しかしながら、1 回の斜面崩壊で 10 億円オーダーの堆砂対策費用が必要になる可能性を示すものである。ダム下流の河川環境改善の観点からも、ダム洪水吐の改造によるクレスト敷高の低下は、現実的かつ効果的な堆砂対策と考えられる。

表-6.10 平成 23 年 H ダムにおける堆砂対策費用試算

試算・評価ケース	平成 23 年堆砂量	排除費用	備 考
水位低下なし、洪水吐改造なし	446 千 m^3	1,115 百万円	
水位低下あり、洪水吐改造なし	320 千 m^3	800 百万円	実績
水位低下あり、洪水吐改造あり	0 千 m^3	0 百万円	

6.4.5 まとめ

N 川のように勾配が大きく、降雨量の大きい河川は、水力開発に有利であるが、その一方で土砂生産・流出が活発であり、その結果、ダム設置による河川への影響が大きくなる。また、勾配が大きいことから、排砂バイパスや排砂ゲート、あるいは出水時にダム水位を低下させる等の流水の力を利用する土砂管理方法の適用性が高い。洪水吐の改造も現実的な対策として考えることができる。よって、このような河川では、掘削排除のような堆砂対策は、特に長期的な観点からは有利ではないと考えられる。

H 調整池では、周辺斜面の深層崩壊によりダム越流が生じ、期せずして出水時にダム水位低下運用を行う結果となった。その出水時には、排除が必要とされていた中・上流域の堆積土砂が死水域に掃砂され、結果的に浸水被害リスクを低減させる結果となった。この実績は、調整池においてダム水位低下運用による堆砂対策の適用性が高いことを示すものである。

6.5 水力発電用ダム湖における総合土砂管理の課題

水力発電設備を持続的に利用していくためには、掘削排除よりもスルーシング・フラッシング排砂や排砂バイパスの設置・利用等の流水を利用してダム湖流入土砂をダム下流へ供給していく管理方法が有利であることを論じてきた。海域までを含む流域の総合土砂管理の観点からも、同様に掘削排除よりもダム下流へ土砂を流していく方法が望まれている。スルーシング・フラッシング排砂、排砂バイパス、さらにはダム下流置土による河川土砂還元の事例も多くなり、技術的にも成熟しつつあるとともに、社会的にその活動や効果が認知されつつある。河川土砂還元は少しずつながらも適用を増やしつつあるが、その一方、排砂による土砂管理方法の適用はあまり拡大していない。

排砂による土砂管理方法の適用が拡大しない主な理由として、設備投資・維持管理に大きな費用を要すること、流域関係者の合意形成の難しさが挙げられる。本節では、これら 2 つの課題について検討する。

6.5.1 設備投資を伴う堆砂対策費用

排砂による土砂管理方法のうち、大きな設備投資の必要があり、国内でいくつかの事例がある、排砂バイパスについて整理・分析を行う。

6.5.1.1 排砂バイパスの事例

排砂バイパスは近年、我が国において本格的に適用・検討が進められているものの、世界的にみれば事例は多いとはいえない。表－6.11 に建設中の地点を含む主な事例を示す。

我が国において、近年、排砂バイパスの設置・運用実績があるのは、旭ダムおよび美和ダムの 2 地点である。旭ダムにおいては、濁水長期化軽減、貯水池堆砂対策、ダム下流河川環境改善において大きな効果が得られていると報告¹⁵⁾されている。美和ダムについても、排砂バイパス呑口部上流に設置された貯砂ダムおよび分派堰とともに、貯水池堆砂対策に効果を発揮していると報告¹⁸⁾されている。

表－6.11 排砂バイパスの事例¹⁵⁾¹⁸⁾¹⁹⁾²⁰⁾²¹⁾²²⁾

地 点	旭ダム	美和ダム	小渋ダム	松川ダム	Rempenダム	Solisダム
設置年	1998年	2005年	(建設中)	(建設中)	1983年	(建設中)
水 系	新宮川水系	天竜川水系	天竜川水系	天竜川水系	Rhein (スイス)	Rhein (スイス)
総貯水容量	15,470千m ³	34,300千m ³	58,000千m ³	7,400千m ³	360千m ³	1,500千m ³
流域面積	39.2km ²	311.1km ²	288km ²	60km ²	22km ²	900km ²
バイパス設置目的	濁水・堆砂対策	堆砂対策	堆砂対策	堆砂対策	堆砂対策	堆砂対策
バイパス設計流量	140m ³ /sec	300m ³ /sec	370m ³ /sec	200m ³ /sec	80m ³ /sec	170m ³ /sec
バイパス延長	2,350m	4,308m	3,982m	1,417m	450m	968m
バイパス底面幅	3.8m	7.8m	6.1m	5.2m	3.5m	4.4
バイパス縦断勾配	2.9%	1%	2%	4%	4%	1.9%

6.5.1.2 排砂バイパスに係る費用

排砂バイパスについては、これまでの実績から堆砂対策として大きな効果を期待することができる。土砂生産・流出が活発で、貯水池回転率が大きい我が国においては、図－3.27に示した通り適用できる地点は多い²³⁾。さらには、平成9年の河川法改正²⁴⁾時に「総合土砂管理」として盛り込まれた、河川における土砂移動の連続性を重視する考え方にも適合する。しかしながら、排砂バイパスの堆砂対策への適用は進んでいるとは言い難い。その主な理由として、河川の上流から河口を含む下流までの流域規模での合意形成の難しさと、排砂バイパスの設置および維持管理に係る費用の大きさが挙げられる。ここでは、後者の排砂バイパスに係る費用について論じる。

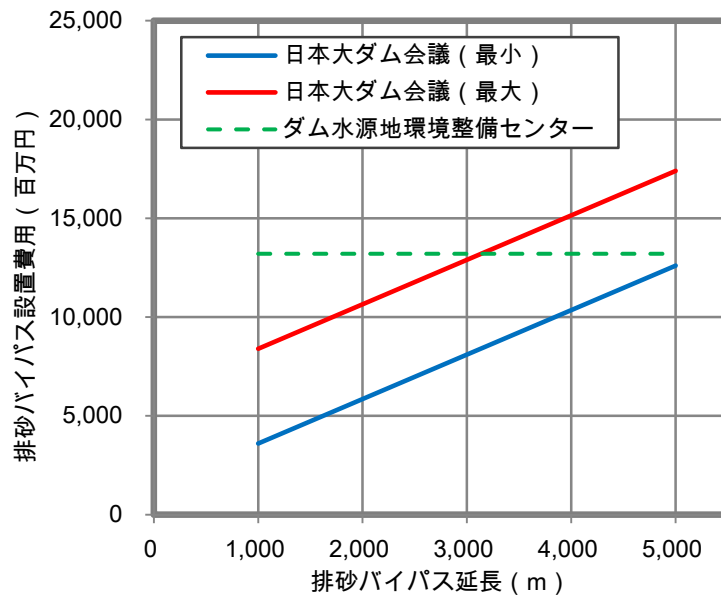
排砂バイパスに係る費用について、堆砂対策ノート¹⁶⁾および日本大ダム会議土砂管理分科会²⁵⁾がとりまとめた結果を表－6.12に示す。

表－6.12 排砂バイパスに係る費用¹⁶⁾²⁵⁾

資 料	ダムの堆砂対策ノート ¹⁶⁾ (ダム水源地環境整備センター)	土砂管理分科会報告 ²⁵⁾ (日本大ダム会議)
内 容	排砂バイパス建設：132億円/条 排砂バイパス維持管理 ：1.21億円/年	排砂バイパス掘削：約150万円/m (トンネル内空5m) ゲート：約2億円／2門 (トンネル内空5m) 分流堰：7億円～27億円 その他（魚道、水路整備、他） ：0億円～12億円 排砂バイパス維持管理費用： 約3,000万円/年 (幅3.8m、延長2,350m)

表－6.12を基に、内空5.0mの排砂バイパスを設置する場合の費用についての試算結果を図－6.14に示す。試算結果は、排砂バイパス設置に関係して必要となる費用を含んでいる。分派堰やその他（魚道、水路整備、他）については費用に幅があるが、現地条件に応じて変化するためである。

延長1,000mの排砂バイパスを設置する場合は、分流堰、魚道、水路といった関連設備の費用割合が大きくなるため、その仕様によって総工事費は大きく変動する。一方、延長が大きくなる場合はバイパス（トンネル）掘削費用が大きくなるため、関連設備よりもトンネルの仕様によって総工事費が変動することとなる。トンネルの仕様とは、具体的にはルート選定、バイパスする流量の設定等である。



図－6.14 排砂バイパス設置に係る費用

100 億円程度かかる設置費用に対し、維持管理費用は年間にその 0.5%～1%程度がかかる見込みとなるが、長期的に運用していくことを考えると、最適な設備仕様と維持管理方法の選定が重要となる。

6.5.1.3 排砂バイパスの適用検討

F ダム調整池への排砂バイパス適用について検討する。F ダム調整池では、年間平均 240 千 m^3 の堆砂進行が生じている。調整池内の堆砂状況から、約 140 千 m^3 が調整池上流から、残りの 100 千 m^3 がダム上流 5,000m 地点に流入する支川から流入・堆積していることが分かる。よって、F ダム調整池に排砂バイパスを設置する場合、本川に設置する方法と、支川に設置する場合の 2 ルートが考えられる。また、バイパスの勾配を考慮して、支川の上流に呑口部を設置するルートも想定できる。これらの 3 ルートを図－6.15 に示す。

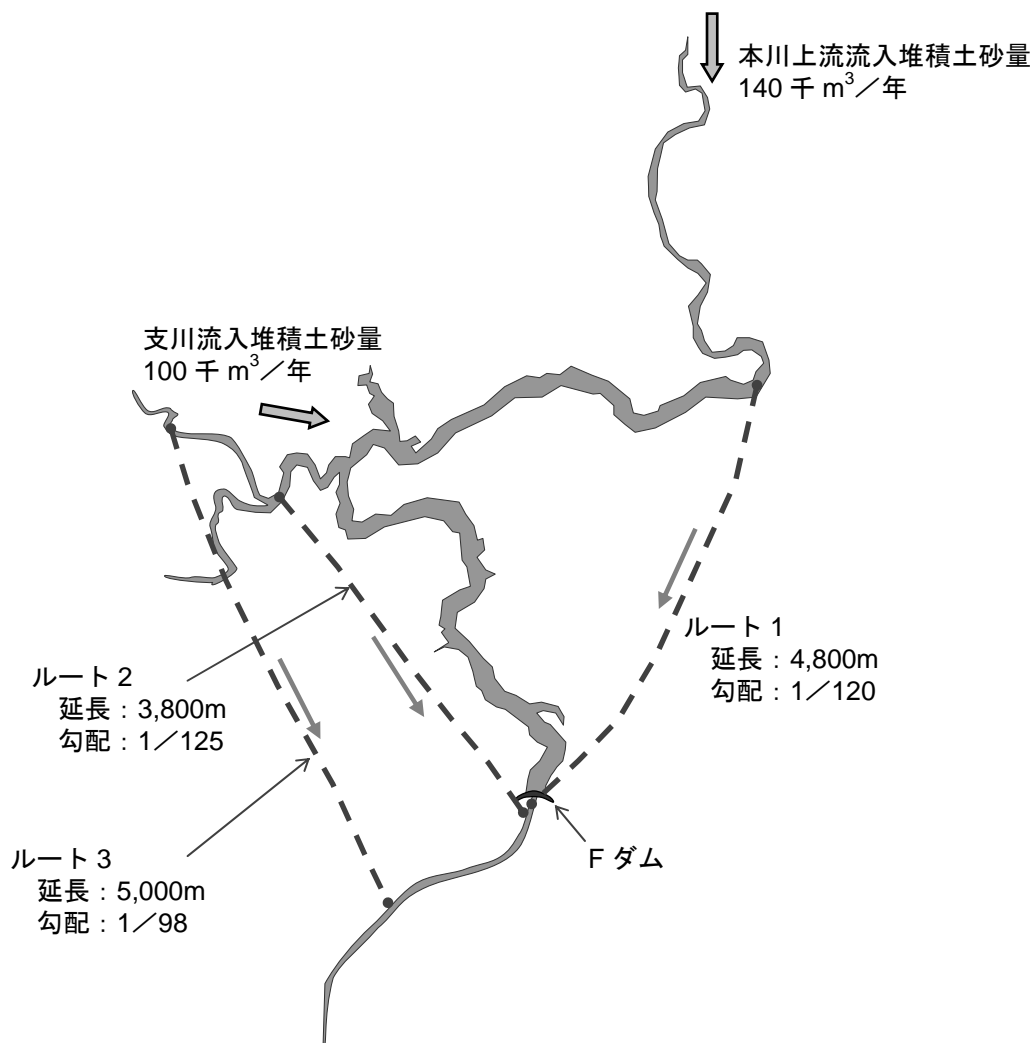


図-6.15 F ダム調整池における排砂バイパス設置ルート

これらの 3 つのルートについて、かかる費用を期待されるバイパス土砂量で除して、堆砂対策単価を求める。角らが行った水理模型実験結果²⁶⁾によると、流量の 30%程度を排砂バイパス呑口部で取水すれば、それ以上の流量を取水しても掃流砂をバイパスへ取り込む能力は大きく変わらないことが分かっており、概ね掃流砂の 80%以上を捕捉することが可能であるとしている。旭ダム地点において行われたシミュレーション結果¹⁵⁾では、全流砂量の 75%程度を排砂バイパス呑口部で取り込むことができるとしている。これらを参考にして、本検討では呑口部での流砂呑み込みの割合を 70%に設定する。各ルートの条件および費用検討結果を表-6.13 に示す。

バイパス設置費用算定にあたっては、日本大ダム会議の土砂管理分科会報告²⁵⁾を参考にし、設備の大規模改修に要する費用も計上した。費用については幅のある表現としているが、現地の条件に応じて変動するためであり、図-6.14 に示した範囲と同様の意味である。

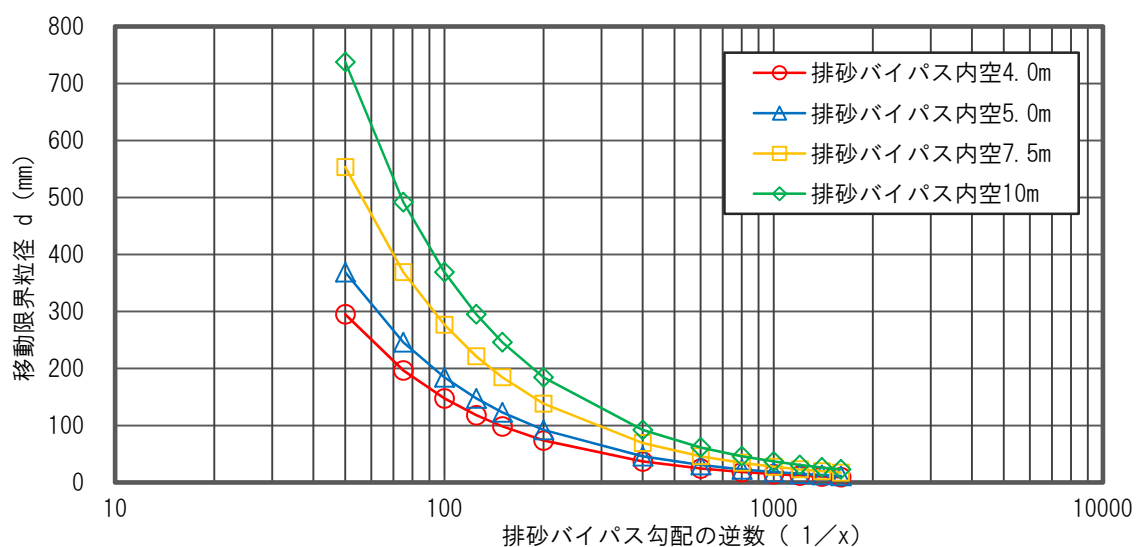
表-6.13 Fダム調整池排砂バイパス費用検討

項 目	ルート1	ルート2	ルート3
ルート	本川からダム下流	支川からダム下流	支川上流からダム下流
延長・勾配	4,800m・1/120 (0.83%)	3,800m・1/125 (0.80%)	5,000m・1/98 (1.0%)
バイパス流量	300m ³ /sec (実績最大)	130m ³ /sec	90m ³ /sec
バイパス内空	8.0m	5.0m	4.0m
期待バイパス土砂量	69千m ³ /年	70千m ³ /年	62千m ³ /年
バイパス設置費用	188億円～271億円	99億円～147億円	107億円～154億円
バイパス維持管理費用	1.29億円/年	0.64億円/年	0.67億円/年
総バイパス費用 (50年)	273億円～410億円	140億円～220億円	149億円～229億円
総バイパス費用 (100年)	357億円～549億円	181億円～293億円	191億円～303億円
バイパス費用単価 (50年)	8,000～12,000円/m ³	4,000～6,300円/m ³	4,900～7,500円/m ³
バイパス費用単価 (100年)	5,300～8,100円/m ³	2,600～4,200円/m ³	3,100～5,000円/m ³

本川に排砂バイパスを設置して掃流砂をダム下流にバイパスしようとするルート1では、1,000m³/secの通水能力を有する巨大なものが必要となり、現実的ではない。よって、費用検討では、実績のある300m³/secの通水能力に設定し、その分は掃流砂の呑込み能力を低下させた。費用算定結果のうちバイパス費用単価から、ルート1は経済的に有利な方法とは言えないことが分かる。今後、水力発電設備の電源としての重要性、ダム下流への土砂還元の有効性、経済性を確保できる工法や評価方法の開発・採用等によっては、ルート1のような排砂バイパスも適用する環境が整う可能性がある。

ルート2およびルート3については、おおよそ同程度の経済性を有しているといえ、また、設置方法、維持管理方法、使用年数設定によっては、掘削排除単価と同程度にすることが可能である。ルート2はバイパス勾配が小さいが、ルート3は、既設程度のバイパス勾配を確保できている。トンネル内空・勾配と掃流できる最大粒径とを試算した結果を図-6.16および表-6.14に示す。試算においては、トンネル断面を8割の水深で流れることを想定した。試算の結果、ルート2においては130m³/sec程度の流量、最大150mm程度の粒径、ルート3においては83m³/sec程度の流量、最大150mm程度の粒径を流せることが分かった。現地の平均粒径が数十mm程度であることから、ルート2、ルート3の排砂バイパスは必要な機能を有していると判断することができる。

なお、本試算は移動床を想定して行っており、詳細検討には、柏井ら²⁷⁾による固定床上の土砂移動現象を扱ったモデルを使用して試算することが望ましく、水理模型実験等による機能確認も合わせて行う必要がある。



図－6.16 排砂バイパスの勾配および移動限界粒径（最大）

表－6.14 排砂バイパスの勾配別の移動限界粒径（最大）および通水可能流量

バイパス内空	排砂バイパス勾配					
	1/50	1/75	1/100	1/125	1/150	1/200
4.0m	295・116	197・95	148・82	118・73	98・67	74・58
5.0m	369・210	246・171	184・149	148・133	123・121	92・105
7.5m	553・619	369・506	277・438	221・392	184・357	138・310
10m	738・1,333	492・1,089	369・943	295・843	245・770	184・667

移動限界粒径（最大、mm）・通水可能流量（m³/sec）

6.5.1.4 排砂バイパスの経済性

排砂バイパスを採用する場合、初期の設備投資として 100 億円程度を要する、またはそれを超える費用を要することとなる。現状では、この初期投資額が排砂バイパスの採用に積極的になり難い大きな要因となっている。一方、水力発電所を長期的に使用していく観点から、50 年、100 年の単位で費用検討を行うことが適当な設備であると考えられる。長期的な費用検討の結果、掘削排除と同程度の経済性を有していることを示すことが可能となる。

本検討では、ダム下流河川に土砂を還元する効果、土捨場を要しない効果、水力発電設備が持続的に運用される効果、濁水長期化対策としての効果、等については、費用検討の対象としていないが、これらの効果についても、掘削排除と比較して排砂バイパスを設置する場合に得られる。

6.5.2 流域関係者合意形成

ダム湖に流入する土砂をダム下流へ流していく、スルーシング・フラッシング排砂、排砂バイパス、ダム下流への置土等の土砂管理方法を実施するにあたっては、ダム設置者のみで意思決定・実施できるものではなく、河川管理者を主とする流域全体の合意形成が必要である。これらの方法は総合土砂管理の考え方²⁴⁾に整合するものである。置土による河川土砂還元は、実績が積み重ねられていくこと、還元土砂量をコントロールできることから、比較的多くの地点で実施されつつある。しかしながら排砂は、河川への影響が土砂還元と比較して大きく、さらに程度の高い流域関係者の合意形成が必要となることから、その適用をより難しくしていると考えられる。

本節では、流域関係者合意形成に関する事例を紹介し、それらを基に考察を行う。

6.5.2.1 宮崎県耳川における総合的な土砂管理の取組²⁸⁾

耳川は、九州の南東部をほぼ東に流れて日向灘に注ぐ流路延長 94.8km、流域面積 884.1km²の宮崎県有数の二級河川である。豊富な水と落差を活用して、昭和のはじめから水力開発が行われ、現在、九州電力株式会社の 7 つのダムと発電所が設置され、総出力は 34 万 kW であり、年間総発生電力量は 9 億 kWh である。

平成 17 年 9 月に台風 14 号災害が発生し、宮崎県をはじめ日本各地に大きな被害を与えた。台風 14 号は山間部で総雨量が 1,300mm を超え、7 つのダムのうち 5 つのダムで設計洪水量を超えた。耳川流域における浸水被害は過去最大となり、特に山須原ダム貯水池上流端付近に位置する諸塚中心部は甚大な被害となった。大小 491 箇所の斜面が崩壊し、河川やダム貯水池に大量の土砂や倒木が流れ込んだことが水害を大きくすることにつながった。斜面崩壊等により 1,060 万 m³の土砂が河川に流入し、そのうち約半分がダム貯水池に堆積するとともに、今後、2,000 万 m³から 3,000 万 m³の土砂流入が危惧されている。

これらの被害を受けて、耳川では、河川管理者である宮崎県と九州電力株式会社が連携して、流域関係者が一体となった「良い耳川にする」ための協働の取組を推進し、平成 23 年 10 月に流域関係者共通の基軸となる「耳川水系総合土砂管理計画」を取りまとめた。その目的は、①河川の安全、②水の利用、③河川環境の保全、である。

宮崎県は、総合土砂管理計画を継続的に評価改善しながら進めていく仕組みとして、図-6.17に示す技術検討会を平成21年7月に設立した。技術ワーキンググループでは、地域と行政と民間が連携して活動する。技術ワーキンググループでは、各領域の目指す方向性を定めるとともに、役割分担を明確にする「行動計画」を定めた。

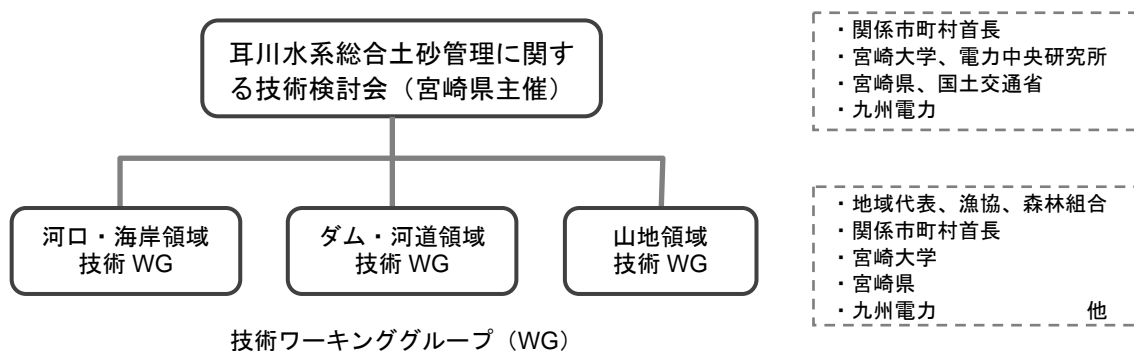


図-6.17 宮崎県耳川水系総合土砂管理に関する技術検討会の体制 ²⁸⁾

宮崎県耳川における取組体制は、今後、総合土砂管理を実現していこうとする各流域の参考となるものである。河川管理者が中心となって地域と民間が連携して、学識経験者の知見を取り入れて最適な計画を策定し、計画を継続的に評価改善していくというものである。このような体制を構築するには、強い動機と多大な労力が必要となると考えられ、耳川では平成17年台風14号災害がその契機となったといえよう。今後、この活動を参考にして他河川で総合土砂管理を計画・実施していく場合、災害等の契機がない場合でも、労力を注ぐよう努力することが必要である。

6.5.2.2 流域委員会の取組

平成9年の河川法改正によって、ダム建設や堤防整備などの具体的な河川事業の実施について定める河川整備計画を策定することとなり、その策定段階において、学識経験者、関係住民、地方自治体の長が関与することが規定されている。この法改正に基づいて、各河川で河川整備計画を策定する際には、流域委員会の設置をはじめとした様々な取組を河川管理者らは行っている。

この流域委員会について、大野 ²⁹⁾ は多数事例研究を行い、以下に示すような興味深い結果をとりまとめている。

・流域委員会の構成は様々であり、構成等の特徴から以下の a) ～g) に示す 7 つの型に分けることができる。

- a) 漁協参加型
- b) 逆転現象型（河川整備基本方針が策定される前に流域委員会設置）
- c) 研究者優位型
- d) 環境 NPO 参加型
- e) 首長優位型
- f) 多人数・環境 NPO 参加型
- g) 少人数・研究者優位・土地改良区参加型

・流域委員会の主目的は、学識経験者の意見を反映させることであるが、学識経験者は構成員の半分程度であり、残りは利害関係者となっている。

・研究者優位型の流域委員会が、審議回数が最も少ない。

これらの結果は、流域の合意形成の難しさを示しているといえる。河川法 16 条に基づいて設置される流域委員会について、その構成が流域ごとに大きく異なるということは、構成メンバーの選定が難しく、流域の利用状況等による影響を受けることを示している。さらに、選定した構成メンバーの半分程度が利害関係者となり、河川を俯瞰的にとらえた議論が難しくなり、その結果、合意形成も難しくなることとなる。一方、研究者が優位な場においては、第三者の立場で河川を俯瞰的にとらえることができ、議論がスムーズに進んだものと推察する。

河川法 16 条では、学識経験者の意見を聴き、住民に対しては公聴会等の開催等により意見を反映させる、と記載されている。つまり、流域委員会は利害関係者がそれぞれの立場で、主義・主張をするような場ではないということである。河川整備計画を策定する流域委員会と総合土砂管理計画の策定をする場とは必ずしも同一ではないが、総合土砂管理を達成しようとする場合、学識経験者の俯瞰的な意見により議論がリードがリードされ、得られた結果を地域や民間が理解して協力する体制を作ることが重要であると考ええる。

6.5.3 まとめ

総合土砂管理の達成には、技術的課題と社会的課題の 2 つがある。技術的課題については、排砂バイパスを取り上げ、その設置・維持管理に係る費用から、堆砂対策としての単価を求め、長期的には掘削排除と同程度とできる可能性を示した。また、ダム下流の河川環境への好影響、海浜海域への好影響、達成される水力発電設備の持続性等を考慮すると、掘削排除と比較してより有利と考えられる。

流域関係者の合意形成については、宮崎県耳川での総合土砂管理の取組、河川法 16 条に基づく流域委員会の取組を基に、考察を行った。宮崎県耳川での取組は、流域が一体とな

っており、各流域の参考となるものである。また、流域委員会の取組は河川ごとに様々であり、そのとりまとめ結果は、地域の合意形成の難しさを示す一方、学識経験者を中心に方針・計画をまとめていくことの有効性を示しているといえる。

6.6 まとめ

第 6 章では、ダム設置者のみならず、流域関係者の観点からも含めた総合土砂管理について論じた。6 章までの検討を踏まえた長期的な堆砂対策を示すとともに、その実現に際し課題となる主要な事項について検討を行い、対応策の方向性を示した。

得られた成果を以下に示す。

- ・ダム設置者が堆砂対策において得たい成果と流域関係者が望む堆砂対策効果との間には相違があり、現状においては、ダム設置者の観点での堆砂対策が行われている場合が殆どである。長期的な堆砂対策を検討する場合、流域関係者の望む堆砂対策効果に応える対策とする必要がある。
- ・ダム設置者が長期的な観点から堆砂対策を検討する場合、膨大な数量への対応、経済性確保の観点から、主として流水の力を利用する堆砂対策が採用されることが予想され、自ずと流域関係者の期待に応える結果となる。
- ・平成 23 年は大規模な出水や出水に伴う土砂生産およびダム湖への土砂流入・堆積が生じた。これらへの対応として、掘削排除では立ち行かなくなる可能性が高く、流水の力を利用することが必要であり、掘削排除に比較して経済性が高いと考えられる。
- ・排砂による堆砂対策を実現するには、総合土砂管理計画との整合性を確保する必要がある。そのためには流域関係者の合意形成が必要であり、学識経験者による俯瞰的な意見により議論がリードされ、地域や民間が得られた結果・方針に協力する体制の整備が必要である。
- ・規模の大きなダム湖への排砂バイパスについては、技術的課題があり、今後、検討していく必要がある。

参考文献

- 1) 建設省河川局：ダムの堆砂状況調査要領（案），建設省河川局開発課課長補佐事務連絡平成4年3月9日，1992.
- 2) 国土交通省河川局河川環境課：ダム定期検査規定，平成14年2月，2002.
- 3) 通商産業省：電気関係報告規則，昭和40年通商産業省令第54号，1965.
- 4) 経済産業省原子力安全・保安院：貯水池および調整池堆砂状況等記録すべき内容について，NISA-234b-04-1，平成16・03・26原院第3号，2004.
- 5) （社）電力土木技術協会：水力発電ダム堆砂に関わる調査と啓発 調査報告書，2006.
- 6) （社）日本大ダム会議土砂管理分科会：土砂管理分科会報告書―貯水池の土砂動態と土砂制御法―，大ダム No.212，pp12-129，2010.
- 7) 高田康史，角哲也：土砂管理の軽減を目的とした治水利水分離型ダム事業のライフサイクルコストに関する研究，河川技術論文集，第10巻，2004年6月，2004.
- 8) 土居裕幸ら：排砂バイパス設備を用いたダム下流河川の環境保全，第7回東アジア地域ダム会議中国鄭州大会，2011.
- 9) 太田耕一ら：出し平ダム・宇奈月ダム連携排砂・通砂における環境調査の概要，電力土木 No.334，pp30-34，2008.
- 10) 角哲也，藤田正治：下流河川への土砂還元の現状と課題，河川技術論文集，第15巻，2009年6月，2009.
- 11) 伴田勝，角哲也：土砂資源マネジメントの観点によるダム堆砂リサイクル事業の検討，河川技術論文集，第15巻，2009年6月，2009.
- 12) 司馬遼太郎：街道をゆく 12 十津川街道，朝日文庫，2008.
- 13) 気象庁：気象統計情報，台風経路 2011 年第 12 号
- 14) 国土交通省：平成 23 年台風 12 号による被害状況について（第 52 報）概要版，平成 12 年 1 月 11 日，2012.
- 15) H. Fukuroi : Damage from Typhoon Talas to Civil Engineering Structures for Hydropower and the Effect of the Sediment Bypass System at Asahi Dam, International Symposium on Dams for a Changing World, CIGB ICOLD 2012 Kyoto, 2012.
- 16) （財）ダム水源地環境整備センター：ダムの堆砂対策技術ノート―ダムの機能向上と環境改善に向けて―，2008.
- 17) （独）土木研究所：高知県北川村で発生した土砂災害の調査結果，2011.
- 18) 国土交通省中部地方整備局三峰川総合開発工事事務所：美和ダム「恒久堆砂対策施設」モニタリング調査結果―平成 18 年度・平成 19 年度―，2008.
- 19) 国土交通省中部地方整備局 T 川ダム統合管理事務所：T 川水系南アルプスの貯水池美和ダム・小渋ダム 小渋ダム土砂バイパストンネル工事進捗状況（平成 24 年 3 月 31 日現在），2012.

- 20) 長野県建設部飯田建設事務所松川管理事務所：松川ダム再開発事業の概要，2012
- 21) 角哲也：流れ下る氷河－スイスにおける貯水池土砂管理－（PARTⅡ），大ダム No.212（2010－7），2010.
- 22) C. Auel, R.M. Boes : Sediment bypass tunnel design --- review and outlook, Dams and Reservoirs under Changing Challenges --- Shleiss & Voes (EDS), ICOLD 2011.
- 23) 角哲也：排砂効率および環境適合を考慮したダム堆砂対策の選択，土砂管理とダムに関する国際シンポジウム～第2回東アジア地域ダム会議～，pp17-28，2005.
- 24) 国土交通省河川局：河川法および河川法施行令改正，平成9年6月，1997.
- 25) （社）日本大ダム会議土砂管理分科会：土砂管理分科会報告書－貯水池の土砂動態と土砂制御法－，大ダム No.212，pp12－129，2010.
- 26) 角哲也, 柏井条介ら：土砂バイパス施設分派部の水理的検討, 大ダム No.164(1998－7)，世界大ダム会議第19回大会提出課題論文 Q.74－R.59，1998.
- 27) 柏井条介：排砂水路，土砂バイパス水路における砂礫の輸送特性，ダム技術 No.246（2007.3），2007.
- 28) 朝崎勝之，加来睦宏，山上裕也：ダム貯水池における堆砂問題とその対策（第6回）－耳川水系での取組－，電力土木 No.360（2012.7），2012.
- 29) 大野智彦：流域委員会の制度的特徴－クラスター分析による類型化－，社団法人日本治山治水協会，水利科学 No.328，2012.

第七章 結 論

我が国は、エネルギー問題に直面している。エネルギー問題とは、現時点における原発事故に関わる電力供給不安定のみをいうものではない。低いエネルギー自給率、枯渇する化石燃料、高騰する化石燃料価格、これらに伴って生じる電気料金の上昇、国内産業の海外移転等である。このエネルギー問題に対し、水力発電が果たすべき役割は大きく、新規水力開発、既設水力発電設備増強、ダム運用の高度化、そして既設水力発電設備の持続的使用が期待されている。

既設水力発電設備の維持管理において、最重要課題の 1 つとなっているのがダム湖における堆砂対策である。多くの水力発電設備は戦後の復興期に建設され、我が国の活発な土砂生産・流出の影響を受けて、ダム湖における全堆砂率は平均で 10%程度に達している。このため、河床位上昇対策、取水口機能確保、貯水容量確保等を目的として、主に掘削排除による堆砂対策が実施されている。一方、社会がダムに対して求める土砂管理については、近年、おおそ共通認識ができつつあり、平成 9 年に改正された河川法に「河川環境の整備・保全」がうたわれたことにもなっており示された「総合土砂管理」である。それは、流入する土砂をダム湖に貯めずにダム下流へ流していくという考え方である。

ダム設置者である発電事業者が、現状、緊急的に実施している掘削排除を主とする堆砂対策の実施を継続した場合、我が国が直面しているエネルギー問題にいつか対応できなくなることが危惧される。発電事業者は、使命であるエネルギーの安定供給を長期的に達成するという観点から水力発電設備を持続的に使用していく重要性を認識し、将来の河川・海域環境や社会情勢を踏まえ、かつ、事業者として経済性を確保できる堆砂対策を実施していく必要がある。

本研究は、このような背景・目的のもとに行ったものである。

本論文は、第一章の序論から第七章の結論までの 7 つの章で構成している。第一章では、「研究の背景・目的」について論じ、第二章では「水力発電をとりまく情勢」から水力発電を持続的に使用していくことの重要性を論じ、第三章では「水力発電用ダム湖における堆砂進行の特徴や課題」等について整理・分析し、堆砂対策の方向性を示した。第四章および第五章では、第三章の整理・分析の結果を活用して発電用ダム調整池および貯水池について主として流水の力を利用する「堆砂対策」を提案し、その有効性を示した。第六章では、水力発電設備が設置された河川における「総合土砂管理の推進」について、現状を整理するとともに課題を抽出し、その対応策について論じた。第七章では、「研究全体の成果」を総括してとりまとめをおこなった。以下、各章ごとに内容を示す。

第一章では、研究の背景と目的について述べた。我が国の国土の特徴、ダム貯水池開発の歴史と現時点の課題について整理し、そのうえで電源開発株式会社が所有・管理する水

力発電用ダム湖の堆砂状況を示し、堆砂対策が重要課題となっていること、現在実施されている対策の課題について論じた。さらに、堆砂対策、ダム湖土砂管理が向かうべき方向性を社会情勢の変化を背景に論じた。このような状況から、水力発電設備の持続的使用を目的としたダム貯水池堆砂対策について研究するものであると述べた。

第二章では、水力発電をとりまく情勢について整理分析を行い、既設の水力発電設備を持続的に使用していくことの重要性を述べた。水力発電は、その役割が昭和40年頃までのベース供給であった時代から始まり、原子力や火力がベース供給を行うようになると、ピーク供給や、起動・停止が容易である点を活かして電力供給の安定性を保つ電源としての役割を担うようになった。水力発電は電力安定を保つ役割を担うのみならず、再生可能な国産エネルギーであり、発電過程において地球温暖化ガスを殆ど排出しない貴重なエネルギー源であることを述べ、最近では、気候変動、激甚化する自然現象、不安定な再生可能エネルギー導入の進行、等があり、水力発電はさらにその重要性を増すとともに、これらの事象に対応するべく維持管理を確実に行っていかなければならないと論じた。

第三章では、水力発電用ダム湖における堆砂状況、堆砂問題、および対策について整理分析を行った。計画・設計時には、ダム湖内に計画堆砂容量を設けることを堆砂対策とするが、この方法は限界を有しており、既にいくつかの地点では限界を超過していることを指摘した。また、水力発電用ダム湖を貯水池と調整池とに分けて、特徴や問題点を整理した結果、両者の間には貯水容量や運用方式の違いのみならず、堆砂形状や堆砂がダム湖周辺に及ぼす影響等の面で異なっていることが明らかとなった。これらの特徴や問題点は、対策を構築するうえで考慮すべき重要な事項である。

調整池においては、ダム湖の規模に対して流入土砂量が多いうえに、ダム水位運用の幅が小さいため満水面近くに堆砂が生じやすい。また、貯水池に比較して河川の下流に設置されているため周辺社会資本整備も進んでおり、堆砂進行が浸水被害リスクの増大につながりやすい。その一方、ダム水位を出水時に低下させることによる掃砂効果は大きく、堆砂対策における要点とした。

貯水池においては、浸水被害の面、発電運用の面で、堆砂進行の影響は小さいと評価されている。しかし、堆砂進行と発電運用との関係について運用記録をもとに詳細に分析し、分析結果から両者の間に相関性があること示した。長期的に堆砂が進行していくと、発電運用へ及ぼす影響は大きくなり、水力発電設備を持続的に使用していく中で、大きな損失となる恐れがあることを指摘した。

第四章では、調整池における堆砂対策を、第三章での整理分析結果を活かして構築し、河床変動数値解析により物理的有効性、対策費用計算により経済性の評価を行った。調整地は、上流に貯水池があり水補給を受けられることから、出水時にダム水位を低下させて

ダム湖内の掃流力を大きくし、流入・堆積土砂を掃砂する方法が有効である。調整池は、ダムの規模に対して洪水吐ゲートが大きく、比較的ダム水位低下を大きく行うことができる。調整池は、堆砂状況や出水時の水面形状により 3 つのタイプに分けることができ、それぞれの特性に合わせて、出水時ダム水位低下運用を主とする堆砂対策を提案した。それぞれの対策について、河床変動数値解析により物理的有効性があることを確認し、対策費用を計算し経済性があることを示した。さらに、ダム高と洪水吐ゲート高の関係とダム湖の土砂捕捉率との関係を整理し、ダム高の半分程度の規模の洪水吐ゲート高があれば、完全なスルーシング排砂が達成されることを示した。

第五章では、貯水池における堆砂進行による発電運用影響の将来予測を行い、予測結果から堆砂対策の必要性を論じ、第三章での整理分析結果を活かして堆砂対策を構築した。堆砂進行の影響を予測するために、過去の運用記録から有効貯水容量内の堆砂進行と発電運用との関係进行评估し、貯水池流入水の流況、有効貯水容量、最大発電使用水量の 3 つの関係から水使用の効率を導く式を作成した。作成した式を用いて将来予測を行った結果、特に豊水時と渇水時との流入水量の差が大きい太平洋側の地域で、堆砂進行により水使用の効率の低下が大きいことが分かった。対策として、掘削排除よりも排砂バイパス設置等の設備対応の方が長期的に経済性が高いことを費用計算により示した。また、設備対応を行う場合、設備設置時期が早いほどより多くの貯水容量を温存することが可能となり有利であることを示した。

第六章では、水力発電設備の設置された河川における総合土砂管理の推進について論じた。河川のダム地点における土砂管理は、発電事業者の立場で設備機能が維持され、事業性が確保できれば良いというものでなく、総合土砂管理の観点から海までを含む河川流域として適当であることが望まれる。両者は矛盾するものではなく、発電事業と総合土砂管理の双方に対して、ダム湖に流入する土砂を流水によってダム下流へ供給する堆砂対策・土砂管理は長期的に有効な方法である。しかし、ダム下流へ土砂供給する堆砂対策はあまり採用されていない。その理由として、設備設置に要する用が多大であること、流域関係者の合意形成の難しさ、の 2 つが挙げられる。費用については、長期的に評価すること、最適な設備設計をすることにより、掘削排除程度、またはそれによりも安価なレベルに低減できることを示した。流域関係者の合意形成については、宮崎県耳川における河川管理者、流域関係者、学識経験者の連携による取組例と、河川整備基本方針策定に関わる流域合意形成過程の特徴を整理分析することにより、今後の対応の方向性を示した。

第七章では、研究全体の成果を総括し、とりまとめを行った。さらに、本研究の成果である水力発電設備の持続的使用を達成するダム湖堆砂対策を実行していくうえでの留意点について述べる。

長期的な観点で流域全体を考慮してダム地点の堆砂対策を検討すると、自ずと流水の力を利用しダム下流へ土砂を流していく方法が導かれる。この方法は、物理的に有効であり、長期的には経済性も確保できる。流入土砂が多いダム湖とは、上流河川の勾配が大きく、降雨等により大きな流量が生じやすい地点であるということに他ならず、そのような地点では、排砂バイパスやスルーシング排砂といった流水の力を利用する堆砂対策が有効となる。

流水の力を利用しダム下流河川へ土砂を還元する堆砂対策・土砂管理は、一部で実現・計画されつつあるが、今後、本格的に多くの地点で実現されていくことが期待される。この10年程度の間に、ダム下流河川へ土砂を流す技術は発展し、河川環境を評価する方法もおおよそ一般化され、河川においては土砂が流れている方が良いという共通認識が形成されつつある。今後は、第6章で論じた通り、計画した堆砂対策・土砂管理をどのように実現していくかが主たる課題となる。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、終始懇切丁寧な御指導を賜りました京都大学防災研究所教授角哲也先生に深甚なる謝意を表します。また、京都大学防災研究所教授中川一先生、ならびに京都大学防災研究所教授藤田正治先生には、河川および土砂管理のあるべき姿について数多くのご指導と有益なご助言をいただきました。ここに感謝申し上げます。河川の生態系について、勉強不足であった私に基本的技術から最新技術動向までを机上および現地で丁寧に教えてくださった、京都大学防災研究所准教授竹門康弘先生に感謝いたします。

私がこの研究を進める原点は、私が京都大学防災研究所流域災害部門土砂災害分野の修士学生であった時に河川法が改正され、「流砂系の総合的な土砂管理」の方針が示されたことにあります。この方針は、山地部で生産され、河川を流下する土砂に対し、移動を抑制することにより河川管理・土砂管理を達成しようとしていた方法から、安全に流下させる方法へ変換することを促すものであり、ダム貯水池で進行する堆砂への対応についても大きな変革期となることが期待されました。その後、私は電源開発株式会社に就職し、水力発電所のダム地点において「流砂系の総合的な土砂管理」を達成しようという取組がなされているものの、技術的、経済的、社会的に課題や制約があり、容易ではないことを実感しました。これらの課題を解決し、ダム地点における土砂管理の最適化、河川環境の充実に達成し、水力発電設備の持続的使用を達成することにより社会に貢献したいという思いが、本研究を始める契機となり、研究を続ける原動力となりました。

角研究室では、数多くのディスカッションを研究室メンバーと行いました。ディスカッションを通じて最適な解決策や検討方法を導くのみならず、最新の知見、国内外の河川およびダム地点における取組状況、学生諸君のフレッシュで斬新なアイデア、留学生からは最新の海外事情、等の有益な知見・情報を直接得ることができました。研究室のメンバーに心から感謝します。

私が学部生、修士学生の時から、現時点まで常に私を指導してくださった立命館大学教授里深好文先生に感謝します。幅広い観点と知識に基づいて思考すること、失敗を恐れず積極的に行動し常に前進することの重要性を教えてくださいました。

学位取得の機会を与えてくださった電源開発株式会社に感謝します。今後は、研究を通じて得た技能・知見を基に会社事業、社会に貢献します。

最後に、本研究遂行にあたってご支援、ご協力をいただきました皆様に心より御礼を申し上げます。